



ACTAS XVI CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO 2023

Nuevos desafíos para un territorio en evolución





XVI CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO

“Nuevos desafíos para un territorio en evolución”

26 DE NOVIEMBRE AL 01 DE DICIEMBRE DE 2023

SANTIAGO, CHILE

Organizado por



 @congreso.geologico.chileno

 @congresogeologicochileno

www.congresogeologicochileno.cl

Índice

Prólogo	5
Homenaje a Beatriz Levy	6
Comité Organizador	7
Estructura y Comité Científico	8
Conferencias Plenarias	16
Área Temática 1: Investigación Básica en Geociencias	27
AT1-2. Ciencias Planetarias, Meteoritos y Procesos de Impacto	28
AT1-3. Ciencia de la Zona Crítica en Sistemas Naturales e Intervenidos	57
AT1-4. El rol de los fluidos en la comprensión de procesos magmáticos y volcánicos	75
AT1-5. Geología y Geofísica Marina	79
AT1-6. Geología Antártica	94
AT1-7. El Sistema Terrestre en el Antropoceno	104
AT1-8. Procesos magmáticos durante la evolución volcánica en Chile: desde el manto hacia la superficie	120
AT1-9. Evolución del orógeno Terra Australis en Sudamérica desde el Neoproterozoico al Triásico	161
AT1-10. Evolución de la Tierra en el Límite Árido	176
AT1-11. Tectónica del Arco de Scotia	199
AT1-12. Geocronología: Desafíos, avances y retrocesos utilizando sistemas de isótopos tradicionales y nuevos	209
AT1-13. Volcanismo Monogenético: Explorando su formación y evolución desde la fuente hasta la superficie	214
AT1-14. Los Volcanes más allá de sus Depósitos	228
AT1-15. Tres décadas de grandes erupciones explosivas (VEI>4) en la Zona Volcánica Sur: dinámica, monitoreo, peligros	242
AT1-16. Estudios de fábricas aplicados al entendimiento de procesos ígneos, metamórficos y sedimentarios en los Andes	244
AT1-17. Interacciones agua-roca en sistemas hidrotermales fósiles y activos	247
AT1-18. ¿Qué hay debajo? Arquitectura de sistemas subvolcánicos-magmáticos-hidrotermales-fallas	257
AT1-19. Arcos Magmáticos Fanerozoicos	265
AT1-20. Mecánica de los sistemas de calderas: formación, estructura, monitoreo, reactivación	292
AT1-21. Metamorfismo en el margen andino y su contexto tectónico	296
AT1-22. Terremotos antiguos, recientes y futuros a lo largo del margen Andino	325
AT1-23. Geodinámica y estructura interna del margen Andino y de las placas oceánicas circundantes	335
AT1-24. Paleosismología, neotectónica, tectónica activa y peligro sísmico	349
AT1-25. Dinámicas geomorfológicas y evolución del paisaje a múltiples escalas de tiempo y espacio	379
AT1-26. Paleontología, Estratigrafía y Sedimentología General	421
AT1-27. Tectónica Andina	444
Área Temática 2: Innovación y Tecnología en Geociencias	488
AT2-1. Avances de las ciencias de computación e inteligencia artificial como herramientas críticas para descubrir los recursos minerales necesarios para un futuro sostenible	489
AT2-2. Avances en técnicas y metodologías analíticas para el desarrollo de las ciencias de la tierra	497
AT2-3. Avances en Geofísica de Exploración y Aplicaciones en Minería	510
AT2-4. Geomática y Teledetección	520
AT2-5. Ciencia de datos aplicada a geominerometalurgia	524
AT2-6. Innovación en la gestión de peligros geológicos	526
AT2-7. Sismología: Avances en Innovación y Tecnologías	536
AT2-8. Sesión General	545
Área Temática 3: Recursos Hídricos y Energéticos	547
AT3-1. Sesión General	548
AT3-2. Hidrogeología de Medios Fracturados: entendimiento regional y aplicaciones en minería	561
AT3-3. Exploración y Explotación del Litio	574
AT3-4. Recursos Geotermales: oportunidades para un Desarrollo Sustentable	589

Índice

AT3-5. Hidroquímica y Estabilidad Química aplicada a instalaciones mineras remanentes	612
AT3-6. Recursos hídricos subterráneos: actualidad, sustentabilidad y perspectivas	618
AT3-7. Glaciares de rocas: relevancia hídrica y desafíos para su monitoreo	649
Área Temática 4: Recursos Minerales (652)	654
AT4-1. Caracterización geocientífica de recursos minerales estratégicos y críticos in situ o artificiales para su factibilidad de extracción económica	655
AT4-2. Procesos generadores y concentradores de elementos críticos en el manto, corteza y superficie terrestre	677
AT4-3. Generación de magmas y fluidos fértiles en zonas de subducción	690
AT4-4. Química mineral como herramienta de exploración de yacimientos minerales	697
AT4-5. Naturaleza de la vinculación entre Sistemas Geotermales y Depósitos Minerales: Control de las fallas en la migración y emplazamiento de geofluidos en la corteza	716
AT4-6. Procesos en Superficie y Mineralización	729
AT4-7. Rol de la geometalurgia en el negocio minero	739
AT4-8. Mejores Prácticas en Geociencias Aplicadas a Procesos Mineros	746
AT4-9. Prácticas geocientíficas para una minería responsable	764
AT4-10. Avances en Caracterización Geológica de Depósitos Minerales	768
Área Temática 5: Geociencia Aplicadas	810
AT5-1. Remociones en masa: Presente y perspectivas futuras	811
AT5-2. Peligros Geológicos en Cascada	838
AT5-3. Peligros en la Criósfera: una componente adicional para la gestión del riesgo desde la glaciología	848
AT5-4. Ingeniería Geológica y Geotecnia	853
AT5-5. Geoquímica ambiental: Contaminación geogénica, antrópica y cambio climático. ¿Una amenaza latente o concreta para la Sociedad?	867
AT5-6. Estudio y monitoreo multiparamétrico de procesos eruptivos en el mundo: evolución de técnicas y escalas temporales de observación de sistemas volcánicos	932
AT5-7. El rol de la Planificación Territorial en la Gestión de Riesgo de Desastres	943
AT5-8. Erupciones volcánicas desde una perspectiva integral: evaluación de peligros y gestión del riesgo	947
Área Temática 6: Geociencia y Sociedad (960)	963
AT6-1. Diversidad e Inclusión en Geociencias	964
AT6-2. Mujeres en Geociencias: participación, representación, perspectivas y estrategias para cerrar la brecha de género	971
AT6-3. Geociencias y Transdisciplina en los modelos de Ordenamiento y Gobernanza Territorial	981
AT6-4. Educación en Geociencias	996
AT6-5. Geoética: Geodiversidad, Patrimonio Geológico y Geoconservación	1009
AT6-6. Geoética: Experiencias y casos de estudio en Chile	1040
AT6-7. Divulgación en geociencias: diversificando el acceso al conocimiento	1045
AT6-8. Comunicación de los peligros y riesgos geológicos desde la interdisciplina e innovación: ¿Cómo contribuimos los distintos actores a la preparación para reducir sus impactos?	1072
AT6-9. Historia de la Geología	1081
Auspiciadores	1104
Exhibidores Comerciales	1105
Patrocinadores	1106
Transecta Santiago-Mendoza	1107
Descarga libro guía transecta Santiago-Mendoza	1108

Prólogo

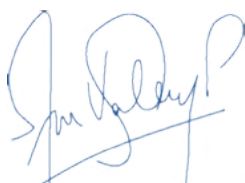
Santiago Julio 2024

El libro de resúmenes del XVI Congreso Geológico de Chile reúne mas de 900 trabajos presentados tanto en formato oral como poster. Durante la semana del 26 de noviembre al 1 de diciembre de 2023 la comunidad geológica chilena y los colegas extranjeros que nos acompañaron en esta oportunidad, tuvimos la oportunidad de actualizar el conocimiento de los trabajos de investigación básica y aplicada en más de 68 sesiones encauzadas en 6 áreas temáticas: Investigación Básica en Geociencias, Innovación y Tecnología en Geociencias, Recursos Hídricos y Energéticos, Recursos Minerales, Geociencias Aplicadas y Geociencias y Sociedad, permitiendo la interacción presencial entre sus asistentes, luego de un hiato de 5 años, debido a la pandemia.

Concluido el evento, favorecido por una adecuada infraestructura ofrecida en arriendo por la Universidad del Desarrollo en su sede de San Carlos de Apoquindo, Santiago, se desarrolló el XVI congreso, con más de 1.000 participantes presenciales, sobre 600 exposiciones orales y algo más de 300 exposiciones posters. Contamos con 12 salas en simultáneo, para disponer la posibilidad que todos los trabajos presentados puedan ser expuesto a la comunidad.

El Comité Organizador del XVI Congreso Geológico Chileno otorgó más de 150 medias becas para que estudiantes de pregrado de las universidades chilenas pudieran asistir y exponer sus trabajos avanzados. A su vez, fueron otorgadas alrededor de 50 becas al 100% de la inscripción, a profesionales que presentaron trabajos y que por alguna situación no podían asistir. Todo esto, en el escenario económico complejo, post pandemia, que afectó a todo el mundo, tanto a la sociedad chilena como latinoamericana.

Con la satisfacción de haber llevado a cabo este evento, sin mayores sobresaltos ni contingencias adversas, invitamos a revisar con mayor detalle todos los trabajos expuestos con la identificación de autor y título del trabajo, para ser referido, desde este volumen digital de resúmenes, el cual permanecerá en el sitio www.congresogeologicochileno.cl y estará activo en la página web de la Sociedad Geológica de Chile www.sociedadgeologica.cl.



Dra. Millarca Valenzuela Picón
Presidenta, Comité Organizador
XVI Congreso Geológico Chileno



Álvaro Puig Godoy
Vice-Presidente, Comité Organizador
XVI Congreso Geológico Chileno

Dedicado a la Memoria Dra. Beatriz Levi Dresner

Figura señera de la geología en Chile



Beatriz nació en Milán (Italia) en el año 1930 pero llega a Chile con tan solo 9 años. Su amor por las matemáticas la llevo a estudiar Ingeniería en la Universidad de Chile, especializando también en Geología, en el año 1958 se transforma en una de las primeras mujeres tituladas de Ingeniería en Minas del país. Tuvo un rol importante en el desarrollo de la geología de Chile, fue parte del Departamento de Minería y Combustibles de la Corporación de Fomento, años mas tarde fue jefa del Laboratorio de Petrografía del Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Realizó sus estudios de postgrado en la Universidad de California en Berkeley, siendo la primera geocientista chilena en obtener un doctorado en el extranjero.

A comienzos de 1967 fue parte del cuerpo académico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, hasta 1971, cuando vuelve al IIG como jefa del Departamento de Exploraciones para liderar los proyectos de exploración destinados a incrementar las reservas de cobre del país. Su amor por la academia la hace crear la Revista Geológica de Chile, cuyo primer número fue publicado por el IIG el año 1974, revista que hasta el presente se mantiene activa bajo el nombre de Andean Geology. Lamentablemente Beatriz abandona el país exiliada tras el Golpe de Estado de 1973, emigrando primero a Costa Rica y finalmente a Suecia, donde ingresa como académica a la Universidad de Estocolmo y se radica definitivamente. En el año 1988 el Colegio de Geólogos de Chile la distinguió con el Premio Nacional de Geología Medalla al Mérito Profesor “Juan Brüggen” por su muy valioso aporte a la geología chilena y su gran calidad científica y humana. Beatriz fallece un 22 de enero de 2022, a la edad de 91 años en Estocolmo, Suecia.

Querida Bice: tus amigos, estudiantes, colegas y todos los que tuvieron el privilegio de conocerte no te olvidarán jamás. Has dejado un legado y una impronta que nos empuja a ser mejores, más solidarios y bondadosos.



Comité Organizador



Presidenta
Millarca Valenzuela
Universidad Católica del Norte



Vice-Presidente
Álvaro Puig
Consultor Independiente



Pro-Secretario
Felipe Orellana
Universidad Católica del Maule



Tesorera
Natalia Astudillo
Servicio Nacional de Geología y Minería



Secretaria y Pro-Tesorera
Claudia López
Colegio de Geólogos de Chile

Editores



Pamela Jara
Universidad de Santiago de Chile



Carlos Marquardt
Pontificia Universidad Católica de Chile



Patricio Cuadra
Consultor Independiente

Past-president



Andrés Tassara
Universidad de Concepción

Estructura y Comité Científico

La Estructura científica del XVI Congreso Geológico Chileno se basó en la definición de 06 Áreas Temáticas (AT):

- Área Temática 1: Investigación Básica en Geociencias
- Área Temática 2: Innovación y Tecnología en Geociencias
- Área Temática 3: Recursos Hídricos y Energéticos
- Área Temática 4: Recursos Minerales
- Área Temática 5: Geociencias Aplicadas
- Área Temática 6: Geociencias y Sociedad

Cada Área Temática, a su vez, estuvo compuesta por Sesiones contribuidas por la comunidad científica.

De acuerdo con esta estructura, el Comité Científico del XVI CGCh fue conformado por los Responsables de las Áreas Temáticas y los Responsables de Sesiones:

Área Temática 1 Investigación Básica en Geociencias Verónica Oliveros Clavijo Reynaldo Charrier González Andrés Tassara Oddó	Área Temática 2 Innovación y Tecnología en Geociencias Marcelo Surjan Arellano	Área Temática 3 Recursos Hídricos y Energéticos Isabel Santibáñez Boric Javier Verdejo Díaz
Área Temática 4 Recursos Minerales José Piquer Romo Irene del Real Contreras Juan Hermosilla Bravo Orlando Rivera Herrera	Área Temática 5 Geociencias Aplicadas Natalia Garrido Urzúa Ivo Fustos-Toribio	Área Temática 6 Geociencias y Sociedad Luisa Pinto Lincoñir José Cabello Lechuga

Área Temática 1: Investigación Básica en Geociencias

AT1-2	Ciencias Planetarias, Meteoritos y Procesos de Impacto	Millarca Valenzuela, Verónica Oliveros, Alexandre Corgne, Daniel Moncada, Adrien Tavernier, Giovanni Leone
AT1-3	Ciencia de la Zona Crítica en Sistemas Naturales e Intervenidos	Alida Pérez-Fodich, Pamela Castillo-Lagos, Marco Pfeiffer, Tania Villaseñor
AT1-4	El rol de los fluidos en la comprensión de procesos magmáticos y volcánicos	Felipe Aguilera, Manuel Inostroza, Susana Layana, Verónica Oliveros, Philippe Robidoux, Pablo Salas
AT1-5	Geología y Geofísica Marina	Rodrigo Fernández, Cristina Ortega, Luis E. Lara, Ximena Contardo, Cristian Rodrigo
AT1-6	Geología Antártica	Rodrigo Fernández, Joaquín Bastías, Fernando Poblete, Paula Castillo
AT1-7	El Sistema Terrestre en el Antropoceno	Tania Villaseñor, Valentina-Flores Aqueveque, Violeta Tolorza, Verónica Oliveros
AT1-8	Procesos magmáticos durante la evolución volcánica en Chile: desde el manto hacia la superficie	Daniela Parra Encalada, Francisca Mallea Lillo, Patricia Larrea, Benigno Godoy, Gabriel Ureta Alfaro, Laura Becerril Carretero
AT1-9	Evolución del orógeno Terra Australis en Sudamérica desde el Neoproterozoico al Triásico	Javiera Morandé, Constantino Mpodozis, Francisco Hervé, Heinrich Bahlburg
AT1-10	Evolución de la Tierra en el Límite Árido	Tibor Dunai, Eduardo Campos, Sébastien Carretier
AT1-11	Tectónica del Arco de Scotia	Mauricio Calderón
AT1-12	Geocronología: Desafíos, avances y retrocesos utilizando sistemas de isótopos tradicionales y nuevos	Katja Deckart, Ryan Mathur
AT1-13	Volcanismo Monogenético: Explorando su formación y evolución desde la fuente hasta la superficie	Daniela Parra Encalada, Francisca Mallea Lillo, Patricia Larrea, Benigno Godoy, Gabriel Ureta Alfaro, Laura Becerril Carretero
AT1-14	Los Volcanes más allá de sus Depósitos	Francisco Cáceres, Álvaro Aravena, Cristian Farias

Área Temática 1: Investigación Básica en Geociencias

AT1-15	Tres décadas de grandes erupciones explosivas (VEI>4) en la Zona Volcánica Sur: dinámica, monitoreo, peligros	Francisco Delgado, Luis Lara, Carlos Cardona
AT1-16	Estudios de fábricas aplicados al entendimiento de procesos ígneos, metamórficos y sedimentarios en los Andes	Nicolás Garibaldi, Ítalo Payacán
AT1-17	Interacciones agua-roca en sistemas hidrotermales fósiles y activos	Pablo Sánchez-Alfaro, Alida Pérez-Fodich, Fernanda Álvarez-Amado, Daniele Tardani
AT1-18	¿Qué hay debajo? Arquitectura de sistemas subvolcánicos-magmáticos-hidrotermales-fallas	John Browning, Matías Clunes, Laura Becerril, Janine Kavanagh
AT1-19	Arcos Magmáticos Fanerozoicos	Verónica Oliveros, Paulina Vásquez, Vanesa Litvak, Juan Otamendi, Marcia Muñoz-Gómez, Rodrigo González
AT1-20	Mecánica de los sistemas de calderas: formación, estructura, monitoreo, reactivación	Matías Villarroel, John Browning
AT1-21	Metamorfismo en el margen andino y su contexto tectónico	Gaëlle Plissart, Mauricio Calderón, Francisco Fuentes-Iza
AT1-22	Terremotos antiguos, recientes y futuros a lo largo del margen Andino	Andrés Tassara, Daniel Melnick, Marco Cisternas, Gonzalo Montalva, Marcos Moreno
AT1-23	Geodinámica y estructura interna del margen Andino y de las placas oceánicas circundantes	Andrés Tassara, Eduardo Contreras, Andrei Maksymowicz, Cristian Rodrigo
AT1-24	Paleosismología, neotectónica, tectónica activa y peligro sísmico	Gabriel Easton, Gabriel González, Sofía Rebolledo, Luisa Pinto, María Pía Rodríguez, José González Alfaro, Joaquín Cortés
AT1-25	Dinámicas geomorfológicas y evolución del paisaje a múltiples escalas de tiempo y espacio	Tania Villaseñor, Violeta Tolorza, María Pía Rodríguez, Gabriel Easton, Germán Aguilar
AT1-26	Paleontología, Estratigrafía y Sedimentología General	Reynaldo Charrier, Verónica Oliveros, Andrés Tassara, José Araos
AT1-27	Tectónica Andina	Fernando Martínez, Pamela Jara, Cristopher López

Área Temática 2: Innovación y Tecnología en Geociencias

AT2-1	Avances de las ciencias de computación e inteligencia artificial como herramientas críticas para descubrir los recursos minerales necesarios para un futuro sostenible	Daniel Boyce
AT2-2	Avances en técnicas y metodologías analíticas para el desarrollo de las ciencias de la tierra	Paola Martínez, Angelina Bustos
AT2-3	Avances en Geofísica de Exploración y Aplicaciones en Minería	Jimena Vargas
AT2-4	Geomática y Teledetección	José Manuel Lattus
AT2-5	Ciencia de datos aplicada a geominerometalurgia	Carlos Felipe Prades
AT2-6	Innovación en la gestión de peligros geológicos	Daniela González Guerra
AT2-7	Sismología: Avances en Innovación y Tecnologías	Sergio Ruiz, Christian Sippl, Sebastián Riquelme
AT2-8	Sesión General	Marcelo Surjan

Área Temática 3: Recursos Hídricos y Energéticos

AT3-1	Sesión General	Isabel Santibáñez, Javier Verdejo
AT3-2	Hidrogeología de Medios Fracturados: entendimiento regional y aplicaciones en minería	Tiaren García Pérez, Beatriz Labarca, Javier Verdejo
AT3-3	Exploración y Explotación del Litio	Luciano Achurra, Isabel Santibáñez
AT3-4	Recursos Geotermales: oportunidades para un Desarrollo Sustentable	Diego Morata
AT3-5	Hidroquímica y Estabilidad Química aplicada a instalaciones mineras remanentes	Paula Ramírez, Verónica García, Claudia Oliva
AT3-6	Recursos hídricos subterráneos: actualidad, sustentabilidad y perspectivas	Daniele Tardani, Linda Daniele, Matías Taucare, Sarah Leray, Etienne Bresciani
AT3-7	Glaciares de rocas: relevancia hídrica y desafíos para su monitoreo	Cedomir Marangunic, Felipe Ugalde, Ashley Apey

Área Temática 4: Recursos Minerales

AT4-1	Caracterización geocientífica de recursos minerales estratégicos y críticos in situ o artificiales para su factibilidad de extracción económica	Javier Quevedo
AT4-2	Procesos generadores y concentradores de elementos críticos en el manto, corteza y superficie terrestre	Fernando Álvarez-Amado, Martin Reich, Santiago Tassara, Irene del Real, Gisella Palma-Lira
AT4-3	Generación de magmas y fluidos fértiles en zonas de subducción	Claudio Contreras, Daniele Tardani, Santiago Tassara
AT4-4	Química mineral como herramienta de exploración de yacimientos minerales	Fernando Barra, Irene del Real, Martin Reich
AT4-5	Naturaleza de la vinculación entre Sistemas Geotermales y Depósitos Minerales: Control de las fallas en la migración y emplazamiento de geofluidos en la corteza	Pamela Pérez-Flores, Martín Marquardt, Pablo Sánchez-Alfaro, José Piquer, José Cembrano
AT4-6	Procesos en Superficie y Mineralización	Rodrigo Riquelme, Stephanie Brichau, Carlos Marquardt
AT4-7	Rol de la geometalurgia en el negocio minero	Marcela Oyarzún
AT4-8	Mejores Prácticas en Geociencias Aplicadas a Procesos Mineros	Juan Hermosilla Bravo, Pía Lois-Morales, Alejandra Araneda
AT4-9	Prácticas geocientíficas para una minería responsable	Constanza Araya
AT4-10	Avances en Caracterización Geológica de Depósitos Minerales	Juan Hermosilla Bravo, Rodrigo Castagno Arancibia, Diego Muñoz Soto, Jorge Skármeta Magri

Área Temática 5: Geociencia Aplicadas

AT5-1	Remociones en masa: Presente y perspectivas futuras	Antonio Muñoz, Ivo Fustos-Toribio
AT5-2	Peligros Geológicos en Cascada	Juan F. González Carrasco, Alejandra Serey Amador, Joaquín Cortés Aranda, Edilia Jaque Castillo
AT5-3	Peligros en la Criósfera: una componente adicional para la gestión del riesgo desde la glaciología	Felipe Ugalde, Cedomir Marangunic
AT5-4	Ingeniería Geológica y Geotecnia	Sergio Sepúlveda
AT5-5	Geoquímica ambiental: Contaminación geogénica, antrópica y cambio climático. ¿Una amenaza latente o concreta para la Sociedad?	Ana Valdés, Katja Deckart
AT5-6	Estudio y monitoreo multiparamétrico de procesos eruptivos en el mundo: evolución de técnicas y escalas temporales de observación de sistemas volcánicos	María Angélica Contreras, Gabriela Contreras, Carlos Cardona, Gabriela Velásquez, Luis Franco, Loreto Córdova, Franco Vera
AT5-7	El rol de la Planificación Territorial en la Gestión de Riesgo de Desastres	María Belén Araneda
AT5-8	Erupciones volcánicas desde una perspectiva integral: evaluación de peligros y gestión del riesgo	Franco Vera, José Luis Palma, Francisca Vergara, Carolina Geoffroy, Alfredo Esquivel, Álvaro Aravena, Constanza Perales

Área Temática 6: Geociencia y Sociedad

AT6-1	Diversidad e Inclusión en Geociencias	Natalia Astudillo, Camilo Sánchez, Felipe Orellana, Virginia Toloza
AT6-2	Mujeres en Geociencias: participación, representación, perspectivas y estrategias para cerrar la brecha de género	Tania Villaseñor, Francisca Mallea Lillo, Fernanda Álvarez Amado, Daniela Parra Encalada, Millarca Valenzuela, Camila Zúñiga, Valentina Flores Aqueveque, Diana Comte, Catalina Morales-Yáñez, Cindy Mora Stock, Alejandra Serey Amador
AT6-3	Geociencias y Transdisciplina en los modelos de Ordenamiento y Gobernanza Territorial	Felipe Orellana, Verónica Oliveros, Hernán Bobadilla, Valentina Flores Aqueveque, Francisca Roldán
AT6-4	Educación en Geociencias	Marco Valle, Pas Toledo, Gabriela Tascón, Pablo Azúa, Kristian Agurto, Victoria Arenas, Pablo Salinas, Elisa Ramírez
AT6-5	Geodiversidad, Patrimonio Geológico y Geoconservación	Manuel Schilling, Tomás Martínez, María José Bravo, Romina Figueroa, Diego Partarrieu, Manuel Arenas, Felipe Fuentes
AT6-6	Geoética: Experiencias y casos de estudio en Chile	Luis Pinto, Tania Villaseñor, Hernán Bobadilla
AT6-7	Divulgación en geociencias: diversificando el acceso al conocimiento	Natalia Astudillo, Pas Toledo, Jennifer Ascencio, Paula Zuloaga, Camila Soto
AT6-8	Comunicación de los peligros y riesgos geológicos desde la interdisciplina e innovación: ¿Cómo contribuimos los distintos actores a la preparación para reducir sus impactos?	Alfredo Esquivel, Andrea Vásquez, Juan González, Matías Clunes, Nicolás Mendoza, Isabella Ciocca, Virginia Toloza
AT6-9	Historia de la Geología	Diego Rojo, Miguel Cáceres

CONFERENCIAS PLENARIAS



Relación entre la construcción orogénica, la deformación y el campo de esfuerzos en los Andes Centrales

Laura Giambiagi¹, Silvana Spagnotto²⁻³, Pamela Álvarez⁴, Rodrigo Quiroga¹, Diego Jaldin¹⁻²⁻⁵, José Mescua¹⁻⁶, Matías Barrionuevo¹, Andrés Echaurren¹, Macarena Bertoa del Llano¹, Julieta Suriano¹, Ana Lossada²⁻⁷, Lucas Lothari¹, Ahmad Arnous¹, Andrés Richard²⁻³, Ricardo Gómez²⁻⁸

- (1) CONICET, Grupo de Tectónica, IANIGLA, Mendoza, Argentina
- (2) Grupo de Tectónica, Mendoza, Argentina
- (3) CONICET, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina
- (4) Tehema Consultores Geológicos, Chile
- (5) Universidad Católica del Norte, Chile
- (6) Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
- (7) IDEAN, CONICET, Universidad de Buenos Aires, Argentina
- (8) CONICET, Universidad Nacional de Río Negro, Roca, Argentina

Los Andes Centrales son el resultado de la interacción de placas en la zona de subducción y la geodinámica litosférica y sublitosférica durante los últimos ~100 ma. Durante este periodo, tradicionalmente se han distinguido tres fases tectónicas ocurridas durante el Cretácico Tardío, el Eoceno y el Mioceno-Cuaternario. Sin embargo, otras propuestas interpretan a la formación del orógeno como producto de un régimen contraccional continuo durante los últimos 45 ma, asociado a un gradual engrosamiento de la corteza y ensanchamiento de la raíz cortical. Para discutir estas dos propuestas se construyó una base de datos estructural del segmento del orógeno entre los 15° y 36°S, abarcando el sur de Perú, Bolivia y norte-centro de Chile y Argentina. Los datos recopilados incluyen: fallas mayores, discriminadas según edad de movimiento o reactivación y su cinemática, campos de deformación obtenidos a partir de indicadores cinemáticos o desplazamiento de fallas, campos de esfuerzos obtenidos a partir de la inversión de datos de movimiento de fallas o mecanismos focales, y la orientación del esfuerzo horizontal máximo (SHmax) y del esfuerzo horizontal mínimo (Shmin).

A partir de esta base de datos y de su integración con datos publicados sobre análisis de cuencas, petrológicos, termocronológicos y geoquímicos, se discriminaron 9 etapas dentro de la orogenia andina. Para cada una de estas etapas se construyó un mapa de esfuerzos que muestra el tipo de campo de esfuerzos y la orientación de los vectores SHmax y Shmin. Estos mapas, que forman parte del Proyecto CAFE (Central Andean stress permiten identificar: períodos de máxima contracción cortical, períodos dominados por campos de esfuerzos transcurrentes o extensionales y períodos con régimen de esfuerzos híbridos, donde según su ubicación dentro del orógeno el campo de esfuerzos puede estar dominado por esfuerzos tectónicos (campo compresivo o campo con partición de esfuerzos compresivo-transcurrente), esfuerzos gravitatorios (campo transcurrente o extensional) o una combinación de ambos (campos compresivos/transcurrentes, extensionales/transcurrentes, etc). Dentro de los primeros se encuentran los siguientes períodos: Cretácico tardío (100-66 Ma), Eoceno medio a tardío bajo (48-38 Ma), Mioceno temprano (23-16 Ma) y Mioceno medio (16-11 Ma). Dentro de los segundos se encuentran los períodos: Paleoceno a Eoceno temprano (66-48 Ma) y Eoceno tardío alto a Oligoceno (38-23 Ma). Dentro de los terceros se encuentran los períodos: Mioceno tardío (11-5 Ma), Plioceno (5-2 Ma) y Cuaternario (2-0 Ma).

Además de los cambios en el tipo de campo de esfuerzos regional a través del tiempo, los mapas permiten observar cambios locales en la dirección de esfuerzo horizontal máximo. Estos cambios se deben principalmente a deflexiones en los esfuerzos principales cerca de anisotropías corticales, o a zonas con alto gradiente topográfico o con marcados contrastes reológicos.

Palabras Clave: Andes Centrales, Campo de esfuerzos, Deformación, fallas corticales, evolución tectónica.

Financiamiento: ANPCyT (PICT-2016-0269; PICT-2019-0800), GFZ-CONICET consortium (StraTeGy), CONICET (PIP 11220200101409CO)

How Plants Shape Mountains

Todd A. Ehlers¹

(1) University of Glasgow, School of Geographical and Earth Sciences, Glasgow, Scotland, UK

Fascinating interactions between biota, climate, and plate tectonics modulate the Earth's surface and topographic development. These interactions occur over seconds to millions of years and microns to thousands of kilometers. This lecture investigates these interactions and illustrates how state-of-the-art computer models and observed catchment erosion rates from cosmogenic isotopes can be used to understand how vegetation change surprisingly influence the shape and evolution of mountain topography. I will do this by discussing the coupled interactions between paleoclimate, vegetation change, and landscape evolution across the extreme climate and ecological gradient of the Chilean Coastal Cordillera.

The lecture investigates when and under what conditions climate or vegetation change exerts a dominant effect on catchment erosion rates. In addition, I explore how the legacy of past climate and vegetation change influences the interpretation of present-day erosion rates. This is done using a novel coupled numerical modeling approach with a dynamic vegetation model (LPJ-GUESS), landscape evolution model (Landlab), and paleoclimate predictions from the Last Glacial Maximum to the present day (PD) from a downscaled coupled atmosphere-ocean General Circulation Model simulation (TraCE-21ka). Model sensitivity experiments are presented to evaluate the controlling factors (vegetation and climate change) on latitudinal variations in mean catchment erosion rates. Simulations are presented for four idealized study areas spanning arid to temperate climate-ecological zones. Three sets of simulations are presented for each study area to evaluate the sensitivity of erosion rates to changes in precipitation and vegetation cover by grass, shrub, and tree plant functional types. These simulations include (1) fully coupled simulations with transient variations in vegetation cover and precipitation from the LGM to PD time; (2) dynamic vegetation model-derived transient LGM to PD vegetation cover with constant LGM-level values of precipitation; and (3) Constant LGM-levels of vegetation cover with transient LGM to PD variations in precipitation. Results indicate that changes in erosion rates due to vegetation change are due to shifts in the intra-area vegetation composition and the controlling plant functional type in each ecological zone. Changes in precipitation and vegetation cover from the LGM to PD lead to high variability in erosion rates in all study areas. However, there is no long-term significant difference in mean erosion rates from steady-state rock uplift rates. In contrast, areas in semi-arid to humid climatic conditions show less short-term variability but a more pronounced decrease in mean erosion rates compared to rock uplift rates.

The previous model predictions are consistent and supported by observations from 86 millennial timescale catchment average erosion rates from cosmogenic radionuclides that identify a bidirectional response to vegetation's influence on erosion. The bidirectional response depends on the amount of vegetation cover within a catchment and can lead to either a weak (arid, low vegetation) or inverse (humid, heavily vegetated) correlation with erosion rates. Taken together, the results demonstrate that individual climate and ecological zones adjust differently to changes in precipitation and vegetation composition (e.g., from grasses to shrubs or trees) without large, associated changes in total vegetation cover.

Keywords: Surface processes, Vegetation, Climate Chang

The Earthquake Problem

Emily Brodsky¹

(1) University of California, Santa Cruz, Earth & Planetary Sciences, 1156 High St, Santa Cruz, CA, USA

Earthquake prediction has simultaneously remained both the central, unsolved problem of our field and the most pertinent issue in the public's imagination. Here I will discuss what we do and do not know about earthquake prediction from two different perspectives. First, we will discuss a fundamental science approach. Earthquakes occur by overcoming fault friction, and therefore quantifying the resistance of faults is a reasonable approach to anticipating earthquake behavior. Values for both static and dynamic friction are required, and the latter is especially difficult to determine on natural faults. However, an extremely large earthquake does provide a rare set of signals that can help determine friction in situ. The Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) was an Integrated Ocean Discovery Program expedition organized specifically to determine stresses by collecting data directly from the fault 1–2 years after the 2011 Mw 9.1 Tohoku earthquake. The geological, rheological, and geophysical information collected has now provided a rich record of stress immediately before, during, and after the earthquake. Together, the observations provide clear evidence that the shear strength during the earthquake is substantially below that predicted by Byerlee's law, which has been a touchstone of earthquake physics and tectonics for a generation. Locally the total stress drop appears to be near total, and stress reversal is even plausible. This complete energy release near the toe of the upper plate may need to be reloaded by plate motion prior to the next similarly large earthquake. The observations of the Tohoku earthquake have changed the conversation around earthquake physics and made extreme coseismic weakening the preferred model for fault behavior.

A second perspective comes from the recognition of slow slip events prior to fast events. Simple fault models predict earthquake nucleation near the eventual hypocenter (self-nucleation). However, some earthquakes have migratory foreshocks and possibly slow slip that travel large distances toward the eventual mainshock hypocenter (migratory nucleation). Scarce observations of migratory nucleation may result from real differences between faults or merely observational limitations. GNSS and passive seismic records of the easily observed daily ice stream earthquake cycle of the Whillans Ice Plain, West Antarctica demonstrate the prevalence of migratory versus self-nucleation in a large-scale, natural stick-slip system. Migratory precursory slip is common, but self-nucleation is nearly absent. This demonstration that migratory nucleation exists on a natural fault implies that more-observable migratory precursors may also occur before some earthquakes.

Based on these two perspectives, I will finish the talk by discussing what needs to be done to make significant progress on the problem. I will describe the SZ4D initiative and how it might help to define the limits and possibilities of predicting geohazards.

Keywords: Earthquakes, Geohazard

Geophysical Characterization of Volcanic Systems and Eruption Mechanisms

Diana Roman¹

(1) Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science, United States

Magmatic processes generate a wide range of seismic phenomena, and a pronounced increase in seismicity is one of the most consistently-observed precursors to a volcanic eruption. With the spread of permanent monitoring networks on volcanoes in recent decades, it has become evident that many (most?) episodes of volcano-seismic unrest do not immediately culminate in eruption. Furthermore, recent retrospective analyses of volcano-seismic data spanning full eruption cycles suggest a possible link between episodes of magma intrusion that do not immediately culminate in eruption and the nature of the eventual eruption (for example, the nature of the run-up to eruption, the eruption's duration and style). Where available, other geophysical observations, such as deformation and thermal emissions, corroborate this emerging perspective. This talk will focus on the unique challenges of conducting seismology research on volcanoes and will highlight several recent case studies at volcanoes in Alaska and Latin America that demonstrate how volcano-seismic quiescence and unrest reflects magmatic processes on timescales from decades to seconds.

Análisis del riesgo derivado de los procesos de la geodinámica externa: El papel de la ingeniería geológica en el ordenamiento territorial

Sergio Mora Castro¹, León Javier Saborío², Gerardo J. Soto³

(1) ARX Consultores

(2) SGSA

(3) Universidad de Costa Rica

El riesgo

El riesgo no se relaciona solamente con los eventos naturales intensos (amenazas), sino también y sobre todo, con la manera inadecuada con la que interviene la vulnerabilidad humana. El riesgo derivado de las amenazas de la geodinámica externa, de la inestabilidad de laderas en particular, debe enfocarse en la comprensión y cuantificación de las variaciones espaciales y temporales de las condiciones geológico-morfológicas, sismogénicas, climáticas globales y locales, y la influencia antrópica (Mora, 2022).

La relación entre el riesgo y la geodinámica externa (i.e. erosión intensa de suelos, deslizamientos, desprendimiento, caída, fragmentación y trayectoria de bloques rocosos; aludes torrenciales, decantación torrencial de sedimentos), los factores naturales y antropogénicos que la rigen (relieve, humedad prevalente del suelo, litología, sismicidad, pluviosidad, variabilidad climática, urbanismo, construcción de infraestructura, impacto ambiental, desorden territorial, calentamiento global) es compleja, multivariable y sus interacciones aún no están completamente documentadas ni resueltas.

Es recalable el hecho de que, en la actualidad, la mayoría de los daños y pérdidas sociales, económicas y ambientales causada por las amenazas de la geodinámica externa, se derivan, sobre todo, de la combinación de la vulnerabilidad humana, la variabilidad climática y la geodinámica interna (sismicidad, vulcanismo). La proporción correspondiente con la influencia del calentamiento global antropogénico es, por el momento, mucho menor. En la Figura 1a se muestra un diagrama sintético del proceso analítico que conduce hacia la determinación de la exposición y posibilidad de daños y pérdidas de los elementos, infraestructura y actividades humanas ante las amenazas de la inestabilidad de laderas.

El análisis del riesgo derivado de la geodinámica externa, cuando se enfoca en el calentamiento global antropogénico (CGA), debe realizarse considerando varios horizontes temporales (e.g. 30, 50, 100 años, etc.), pues la mayoría de los daños y pérdidas está subordinada a la variabilidad climática, la sismicidad, el vulcanismo y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, sobre todo en términos del desorden territorial imperante. Entonces, para realizar un análisis lo más acertado posible se debe comenzar por comprender y separar la influencia respectiva del CGA, del cambio climático natural (CC), tomando en cuenta su frecuencia/recurrencia, los eventos extremos y no-extremos de la variabilidad climática (VC), la situación de los balances hídricos locales y su relación con los aspectos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geomorfológicos y antropogénicos (Mora et al. 2018).

La inaccesibilidad o inexistencia de datos e información en nuestros países en vías de desarrollo, impide realizar análisis, cálculos, modelos y escenarios probabilísticos robustos y con niveles de incertidumbre tolerables. Los modelos globales, Representative Concentration Pathways (RCP) y de reducción de escala (downscaling) no ofrecen una resolución espacial suficiente, por lo que deben ser reforzados y recalibrados con datos locales para refinar los escenarios y para que sus resultados sean de utilidad en el estudio, formulación, ejecución y operación de inversiones en la expansión urbana, proyectos de infraestructura y producción de bienes y servicios. Debe advertirse que en los últimos años han surgido numerosos "estudios" en donde el riesgo se analiza mediante la simple superposición de datos, en un SIG, de algún parámetro al que se le llama "amenaza" y de otro al que se le llama "vulnerabilidad", ambos determinados a partir de datos que no provienen de análisis probabilísticos y no determinísticos rigurosos.

Adicionalmente, las interpolaciones de las celdas de los modelos climáticos globales (i.e. 25 km x 25 km), para generar píxeles con apariencia más resolutive (e.g. 1 km x 1 km), no contribuyen con aumentar la resolución de los datos geoespaciales ni mucho menos de los resultados. Estos ejercicios, que concluyen con la generación de "mapas de riesgo", son sofismas basados en simplificaciones excesivas que, a lo sumo, consisten en un análisis de exposición y que más bien ocasionan desorientación en tomadores de decisiones políticas, empresariales y población. La amenaza debe analizarse mediante la distribución de una variable aleatoria que describe la relación entre la probabilidad de excedencia de su materialización con respecto a la intensidad, aparte de su distribución espacial, recurrencia y celeridad de materialización.

La vulnerabilidad debe analizarse a partir de la distribución de las variables aleatorias que relacionan la probabilidad de excedencia de los daños y pérdidas que pudiesen suceder, con relación con la intensidad con la que se materialice la amenaza. Los daños y pérdidas deben cuantificarse a partir de la fragilidad de los elementos expuestos, los efectos e impactos económicos y sociales sobre los bienes, servicios, infraestructura, la población, el ambiente, los recursos naturales y sobre la calidad e integridad de la vida humana. Entonces, el riesgo debe describirse mediante la función de excedencia de pérdidas (FEP) derivada del número de veces, por año, con que sucederían eventos que igualen o excedan un valor específico. La frecuencia anual de excedencia (tasa de excedencia), se calcula mediante el teorema de la probabilidad total (Cardona et al. 2012):

Eventos

$$v(p) = \sum_{i=1} Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot FA(\text{Evento } i)$$

... en donde:

v(p): Tasa de excedencia de la pérdida **p**

FA (Evento i): Frecuencia anual de materialización del evento **i**

Pr (P>p |Evento i): Probabilidad de que la pérdida **P** supere **p** (materialización del i-ésimo evento).

Tr: Período de recurrencia de la pérdida **p**, i.e. inverso de la tasa de excedencia **v(p)**

P: Pérdidas en los elementos expuestos a los eventos del conjunto de escenarios estocásticos.

Una derivación de este procedimiento puede aplicarse al caso de la inestabilidad de laderas, en particular a los deslizamientos en terrenos de suelos predominantemente finos sometidos a un régimen no-drenado y a la ruptura con una superficie de geometría cóncava hacia arriba (Mora, 2022):

$$R = FEP = \sum_{v,e} N_{v,e} \cdot P((x,y,z/A,V) \cdot (S/V)_v \cdot (EI/S)_{v,e} \cdot V_{v,e} \cdot DPe)$$

donde:

FEP = (R= Riesgo) = Función de excedencia de daños y pérdidas: Durante determinado período, número de veces **N** que, en una localidad específica la masa desprendida de la ladera, de volumen **v**, puede causar daños y pérdidas a los elementos expuestos **e**, localizados a distancias **s** del origen de la masa.

Na,v,e = Frecuencia-recurrencia (1, 5, 10, 50 años...) con área **a** y volumen **v**, del evento **e**

P(x,y,z/A,V) = Probabilidad de extensión de la inestabilidad (**x,y,z** → **x,yi,zi**) y área **Ai** en la corona del terreno inestable (grietas, deslizamiento) y que alcance un volumen **Vi**.

P(S/V)v = Probabilidad de que un volumen de la masa **v**, desplazada ladera abajo, alcance la distancia **s** en donde se encuentra un elemento expuesto **e**.

P(EI/S)v,e = Probabilidad de que un elemento expuesto **e** sea afectado (efecto-impacto, daños-pérdidas, **EI**) por la ruptura del terreno en la corona o por la masa en desplazamiento **v**, a una distancia **s**.

Vi,e = Fragilidad de los elementos expuestos a los daños y pérdidas ante el área, volumen, distancia y energía con las que se manifieste la inestabilidad de la ladera.

DPe = Valor de reposición de los elementos expuestos a los daños y pérdidas.

Influencia del CGA sobre el riesgo

Al analizar el riesgo y su evolución bajo la influencia del CGA en áreas con inestabilidad de laderas, debe indicarse que actualmente la mayor cantidad de los daños y pérdidas son causados por la vulnerabilidad humana expuesta a la geodinámica natural, más que al CC y el CGA. Por ello, el riesgo "nuevo" deberá ser identificado separadamente y agregado al que ya se deriva de la VC, según su evolución temporal de mediano y largo plazo. Al tomar esto en cuenta, se debe analizar la incidencia del CGA sobre la amenaza y vulnerabilidad correspondientes; además, los cambios no serán súbitos, sino progresivos (Mora, 2022a):

Delta Riesgo = Delta Amenaza * Delta Vulnerabilidad:

$$\frac{\partial R}{\partial a, d, t} = \frac{\partial A}{\partial a, t} * \frac{\partial V}{\partial d, t}$$

R: Riesgo

∂R : Cambio del riesgo durante ∂t

A: Amenaza derivada de la inestabilidad de laderas

∂a: Cambio de A, durante ∂t

V: Vulnerabilidad

∂d: Cambio del potencial de daños y pérdidas durante ∂t.

Si se toma como ejemplo la evolución temporal de la intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la precipitación pluvial y su incidencia sobre el nivel freático, las presiones intersticiales y la forma cómo influyen sobre el factor de seguridad de una ladera en equilibrio metaestable, son posibles tres escenarios para el riesgo:

El riesgo no cambia: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} = 0$

El riesgo disminuye: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} < 0$

El riesgo aumenta: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} > 0$

Gestión del riesgo

La gestión del riesgo (GdR) debe ser dinámica y adaptable. Por ello, es una prioridad avanzar en la prognosis y escenarios fundamentados en el mejor juicio ingenieril para terminar de comprender las variables e influencia de la geodinámica externa. El análisis de las variaciones y evolución espaciotemporal de la vulnerabilidad humana y ambiental también es esencial para anticipar y contrarrestar los efectos, impactos, daños y pérdidas económicas y sociales futuras, como insumo relevante del proceso de ordenamiento territorial y del desarrollo sostenible.

Las medidas e instrumentos para la reducción y financiamiento del riesgo (prevención y mitigación estructural y no-estructural; retención y transferencia financiera), deben concebirse y aplicarse para enfrentar, al menos, las situaciones previsibles. La ingeniería financiera debe aliarse para asistir el proceso de toma de decisiones mediante escenarios que comparen “acciones tomadas” vs. “acciones limitadas” vs. “inacción”, mediante la generación y documentación de las métricas correspondientes (e.g. beneficio/costo, valor agregado neto, tasas de descuento, costos de oportunidad, valores de reposición) y otros parámetros financieros, económicos, sociales, culturales y ambientales.

Aparte de ello, no es admisible que en América Latina y el Caribe, no se haya establecido todavía un sistema estable, permanente, integrado y sostenible de vigilancia, observación, advertencia, alarma, respuesta y de comunicación social de las amenazas de la geodinámica externa en carreteras y ciudades. Desafortunadamente, la GdR derivada de la amenaza de la inestabilidad de laderas no es, todavía, una prioridad en muchos países y se mira como un costo, no como inversión, y al cambio climático como el culpable de todos los males.

Las amenazas de la geodinámica externa y su influencia sobre el uso de la tierra

Los resultados del análisis del riesgo derivado de las amenazas y vulnerabilidad derivadas de los procesos de la geodinámica externa deben integrarse a las circunstancias y situaciones bajo las que se encuentra el territorio, las cuales se relacionan con el manejo de las tierras, según las prácticas, tratamiento, protección y mejoramiento de los bienes y servicios proporcionados por el ecosistema. Por lo general, estos factores dependen de la pendiente y morfología del terreno, el clima, hidrología e hidrogeología, tipo y profundidad del suelo, flora y fauna. La capacidad y aptitud de uso de la tierra, determinada en términos físicos y según el principio de la intensidad máxima de uso soportable, sin causar el deterioro físico del suelo, del ambiente y del ecosistema, puede resumirse según las clases siguientes (MAG-MIRENEM; Decreto N°23214, 1994) (Figura 1b):

Clase I. Terrenos adecuados para desarrollo urbano, infraestructura, cultivos agrícolas, pastos y bosques; tiene pocas limitaciones para su uso, más allá de la racionalidad de su ocupación.

Clase II. Terrenos con algunas limitaciones para las actividades; prácticas ligeras de conservación de suelos; se caracterizan por pendiente suave, susceptibilidad moderada a la erosión por agua o viento; profundidad menor a la de un suelo ideal; estructura y facilidad para el laboreo, desarrollo urbano e infraestructura poco desfavorables; contenido moderado de sales minerales, exposición moderada a las inundaciones e inestabilidad de laderas; exceso de humedad corregible mediante drenaje; limitaciones climáticas moderadas.

Clase III. Terrenos con limitaciones severas que reducen la factibilidad del desarrollo urbano e infraestructura; la selección de plantas y especies ganaderas requiere considerar prácticas especializadas de conservación a causa de las pendientes moderadamente elevadas, susceptibilidad elevada a la erosión por agua y viento; inundaciones frecuentes y posibilidad de inestabilidad de laderas; baja fertilidad del subsuelo; exceso de humedad o condiciones de saturación del suelo que continúan después del drenaje; poca profundidad del suelo debido a la presencia de roca subyacente u horizonte endurecido que limitan la profundidad del enraizamiento y capacidad de retención de agua; bajo contenido de nutrientes, suelos alcalino-térreos difícilmente corregibles; salinidad en cantidades moderadas, condiciones climáticas moderadamente limitantes.

Clase IV. Terrenos con limitantes muy severas que restringen el desarrollo urbano e infraestructura; la elección de cultivos requiere de manejo muy cuidadoso; pendientes pronunciadas, susceptibilidad severa a la erosión por agua o viento; suelos de poco espesor; baja capacidad de retención de humedad; inundaciones e inestabilidad de laderas frecuentes; exceso o déficit crónicos de humedad, presencia severa de sales de sodio.

Clase V. Terrenos con limitaciones para el desarrollo urbano, infraestructura, generalmente poco aptos para cultivos y pastos. Las tierras están expuestas a inundación frecuente (casi planos), estaciones secas prolongadas; susceptibilidad media a la erosión; aptos para silvicultura.

Clase VI. Suelos con limitaciones severas para el desarrollo urbano e infraestructura; no aptos para aprovechamiento agrícola, pero que pueden ser utilizados en la producción de pastos, árboles o cultivos especiales en cobertura; con limitaciones difíciles de corregir: pendientes muy pronunciadas, susceptibles a la inestabilidad de laderas y erosión severa, suelos delgados de fertilidad baja, superficialidad de la zona radical, exposición a las inundaciones; exceso de salinidad sódica; aptos para la silvicultura, café, frutas y conservación de la vida silvestre.

Clase VII. Terrenos con limitaciones severas para el desarrollo urbano e infraestructura; no aptos para cultivos; restringidos a la producción de pastos o árboles o conservación de la vida silvestre por su pendiente pronunciada; susceptibles a la erosión e inestabilidad de laderas; suelos de poco espesor, pedregosos, drenaje excesivo, salinidad sódica, estación seca prolongada.

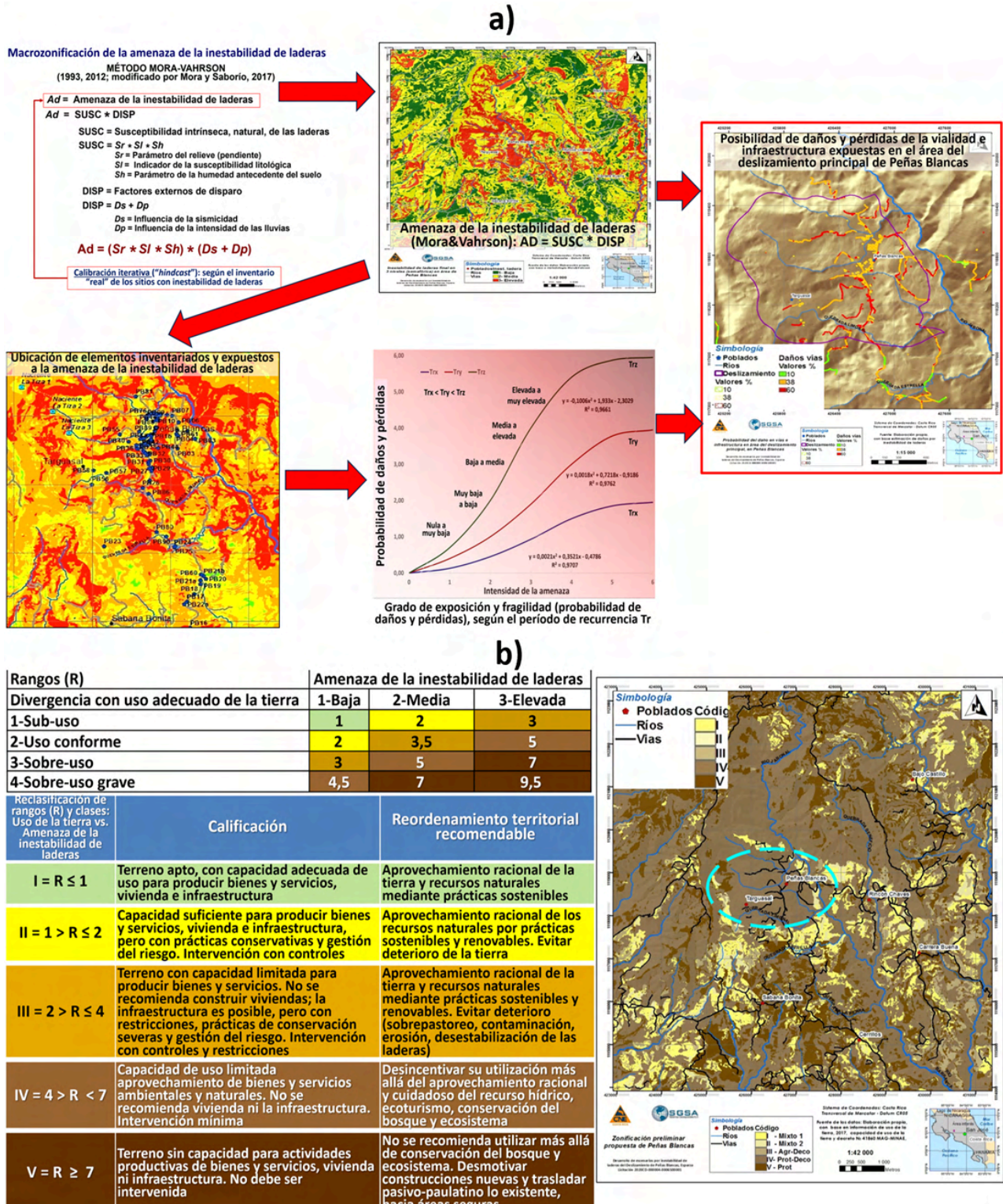


Figura 1. a) Procedimiento analítico de la macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas, según la metodología Mora-Vahrson (1993; modificado por Mora y Saborio, 2017; Saborio et al. 2020 y Mora, 2021. **a)** para el análisis de la exposición y daños potenciales a los elementos humanos expuestos. **b)** Incorporación de la determinación de la amenaza de la inestabilidad de laderas en el proceso de análisis de los rangos y clases para orientar el uso de la tierra, con un ejemplo específico en un área montañosa de Costa Rica (Saborio et al; 2020).

Clase VIII. Terrenos con limitaciones extremas por su susceptibilidad a la erosión, inestabilidad de laderas, presencia de humedales, estación seca prolongada; baja capacidad de retención de humedad, exceso de salinidad sódica; aptos solamente para la preservación de la flora y fauna, protección de áreas protegidas, recarga acuífera, reserva genética del ecosistema, bosque, vida silvestre y conservación del recurso hídrico.

La combinación de las características físicas y ambientales de los terrenos, es decir, de la capacidad de utilización socioeconómica de sus suelos, permite reclasificar las tierras según, al menos, en cuatro categorías territoriales que pueden combinarse con su exposición a las amenazas de la geodinámica externa natural y la impulsada por la actividad humana: i) Subuso de la tierra; ii) Uso conforme y adecuado de la tierra; iii) Sobreuso de la tierra; iv) Sobreuso grave de la tierra (Figura 1b).

Conclusión

La escasez de datos e información, en los países en desarrollo, evita disponer de cálculos probabilísticos, modelos y escenarios con incertidumbres tolerables. Más allá de la robustez de los análisis, necesarios para la prognosis, el juicio geológico e ingenieril son indispensables para descifrar las soluciones racionales, costo-eficientes y enfrentar el riesgo, incluido el agregado por el calentamiento global antropogénico. Desde aquí, las condiciones de la vulnerabilidad humana y ambiental deben ser tomadas en cuenta para cuantificar los efectos, impactos, daños y pérdidas respectivas y de esta manera, encontrar las soluciones correspondientes.

Se subraya que los conceptos y sistemas integrados de “alerta”, advertencia, alarma, respuesta y continuidad operativa, todavía se encuentran en su infancia y necesitan esfuerzos de impulso y desarrollo considerables.

La comunicación social del riesgo también necesita ser reconsiderada y redirigida para compensar las tendencias actuales enfocadas en el sensacionalismo, catastrofismo y alarmismo, y para reforzar, de una vez por todas los procesos educativos y de transmisión objetiva de la información, accesible, para todos los perfiles sociales y culturales imperantes: población, tomadores de decisiones políticas y empresariales.

Es conveniente enfatizar los aspectos ligados con las realidades y del hecho de que una de las soluciones básicas y prioritarias para la gestión del riesgo es el ordenamiento territorial y la reducción de la vulnerabilidad. Ya es hora de cambiar el paradigma y evitar que se siga culpando a la naturaleza y al cambio climático de todos los males y desastres. Es hora de que la gestión del riesgo derivado de las amenazas de la geodinámica externa deje de ser vista como un costo y comience a ser vista como una inversión prioritaria para los países.

Reconocimiento: El estudio original, fundamento de este análisis, fue coordinado y financiado por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica.

Palabras clave: Gestión del riesgo, ingeniería geológica, ordenamiento territorial, geodinámica externa, inestabilidad de laderas, deslizamientos.

Referencias:

- Cardona, O.D.; Ordaz, M; Reinoso, E; Yamín, L; Barbat, A. 2012. CAPRA-Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness. XV WCEE Lisboa. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf.
- MAG-MIRENEM; 1994. Ministerios de Agricultura y Ganadería, Recursos Naturales, Energía y Minas, y Presidencia de la República, Costa Rica. Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM: “Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica”. La Gaceta N° 107- Lunes 6 de junio de 1994. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_articulo.aspx?param1=NRA&nValor1=1&nValor2=17871&nValor3=69087&nValor5=208543.
- Mora, S; Vahrson, G; 1994. Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bull. Assoc. of Eng. Geol. Vol.XXXI-1, p.49-58. https://www.researchgate.net/publication/275971541_Macrozonation_methodology_for_landslide_hazard_determination.
- Mora, S; Saborío, J; Saborío, M; González, J; 2018. Variabilidad climática y calentamiento global antropogénico en el contexto del reordenamiento territorial y planes reguladores en Costa Rica. Documento de apoyo para protocolo. 23pp. https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/06_variabilidad_climatica_y_el_calentamiento_global_antropogenico_-_documento_de_apoyo_para_el_protocolo.pdf.
- Mora, S. 2021. Space-time slope instability hazard analysis, including global warming, in areas with scarce data. Keynote speech. International Symposium Landslides. Cartagena, Colombia, 2020. https://www.researchgate.net/publication/349463187_Space-time_slope_instability_hazard_analysis_including_global_warming_in_areas_with_scarce_data.
- Mora, S; 2022. Geodinámica externa: Aspectos geomecánicos, climáticos y riesgo. Libro, Editorial Asociación Argentina Geología Aplicada a la Ingeniería. 217 pp. <https://www.geologos.or.cr/la-geodinamica-externa-aspectos-geomecanicos-hidrogeologicos-climaticos-y-del-riesgo/>.
- Saborío, J; Soto, GJ; Mora, S. 2020. Desarrollo de escenarios por inestabilidad de laderas en el área de Peñas Blancas, Esparza. Comisión Nacional Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias. SGSA. Costa Rica. https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/biblioteca/informes/INFORME%20PenasBlancas_Final_10Nov20.pdf.

Geoethics, geosciences and global anthropogenic impacts

Silvia Peppoloni¹⁻²⁻³

- 1) National Institute of Geophysics and Volcanology, via di Vigna Murata 605, Rome, Italy
 (2) International Association for Promoting Geoethics (IAPG), via di Vigna Murata 605, Rome, Italy
 (3) IUGS - Commission on Geoethics, via di Vigna Murata 605, Rome, Italy

Science unequivocally acknowledges that humanity is confronting an unparalleled ecological crisis on a planetary scale. Global warming, climate change, pollution, and biodiversity loss are among the outcomes stemming from the escalating human impact on the Earth system (Ripple et al. 2022; Jouffray et al. 2020). The existing polycrisis (Morin and Kern 1999) of human civilization encompasses various social, economic, political, and cultural challenges intertwined with the ecological crisis. In the Anthropocene, what contributions can geoscientists make to address this socio-ecological polycrisis?

Geosciences are vital in managing the intricate connections between humans and the Earth system, thus playing a crucial role in tackling the polycrisis. Specifically, geosciences contribute to the effective functioning of contemporary societies by addressing pressing global challenges, informing decision-making processes, and guiding environmental education across all levels. By providing citizens with the tools to engage in discussions, shape outcomes, and implement solutions to local, regional, national, and global socio-environmental issues, geosciences empower individuals to take decisions for actively addressing these problems.

However, the effectiveness of geosciences' societal contributions relies on geoscientists' awareness of the ethical, social, and cultural implications inherent in their field. It also depends on recognizing the historical responsibilities of geosciences in constructing an unsustainable society. Individual and scientific community involvement is crucial in fostering public trust in geosciences, engaging in activism to promote a knowledge society, and pressuring governing bodies to undertake the essential measures for mitigating climate change and adapting to inevitable environmental shifts.

Essentially, geoscientists must actively engage as agents of social change, advocating for transformative shifts in how human communities manage their land, resources, and natural heritage. Geoscientists possess the privileged position of having the intellectual and material tools to understand the forms and processes of the Earth system and make predictions within certain boundaries. This knowledge should be transparent, widely shared within the scientific community, and disseminated to the public. Geoscientists have a responsibility to educate and communicate their knowledge and findings to the population. Simultaneously, it is crucial to popularize certain concepts such as planetary limits, tipping points, deep time, and socio-ecological systems, shaping individuals' perception of nature. This endeavor is essential for constructing a more ecologically sustainable society, reflecting the fundamental aims of geoethics (Peppoloni and Di Capua 2022).

The essential components of the theoretical framework and operational objectives of geoethics are encapsulated in the following definition (Peppoloni and Di Capua 2023):

Geoethics is a field of theoretical and applied ethics focused on studies related to human-Earth system nexus. Geoethics is the research and reflection on principles and values which underpin appropriate behaviors and practices, wherever human activities interact with the Earth system. Geoethics deals with ways of creating a global ethics framework for guiding individual and social human behaviors, while considering human relational domains, plurality of human needs and visions, planetary boundaries, and geo-ecological tipping points. Geoethics deals with the ethical, social, and cultural implications of geoscience knowledge, education, research, practice, and communication and with the social role and responsibilities of geoscientists.

First and foremost, geoethics represents a professional ethic that emphasizes the responsibility of geoscientists towards themselves and their colleagues (Peppoloni et al. 2019). It ensures that geoscience is conducted with utmost respect for the best scientific methods and employs transparent and accurate procedures to verify research outcomes. However, geoethics extends beyond professional boundaries and encompasses social and ecological aspects. It embodies the ethical responsibility of geoscientists towards citizens and the Earth system. This responsibility becomes evident when geoscientists actively engage with diverse social stakeholders and contribute to the preservation of ecosystems and the promotion of geo-environmental heritage.

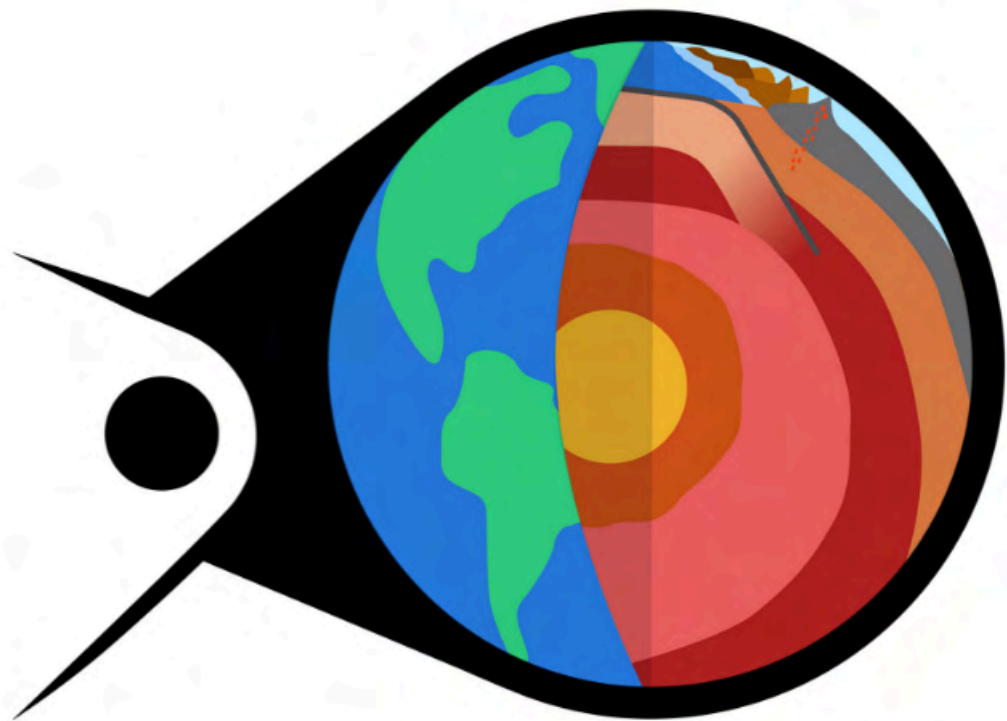
At its core, geoethics embodies the recognition that the value of geosciences lies in the application of scientific rigor, the pursuit of public good, and its transformative potential in shaping people's perception of the natural world.

Keywords: Geoethics, Socio-ecological polycrisis, Geoscientists, Global anthropogenic impacts, Anthropocene.

Referencias:

- Jouffray J.-B., Blasiak R., Norström A.V., Österblom H., and Nyström, M. (2020). The blue acceleration: The trajectory of human expansion into the ocean. *Perspective*, 2, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.016>.
- Morin E. and Kern A.B. (1999). *Homeland Earth: A Manifesto for the New Millenium*. Hampton Press.
- Peppoloni S., Bilham N., and Di Capua G. (2019). Contemporary geoethics within geosciences. In Bohle M. (Ed.), *Exploring geoethics: Ethical implications, societal contexts, and professional obligations of the geosciences*, Palgrave Macmillan, pp. 25-70.
- Peppoloni S. and Di Capua G. (2022). *Geoethics: Manifesto for an ethics of responsibility towards the Earth*. Springer, Cham.
- Peppoloni S. and Di Capua G. (2023). *Geoethics for Redefining Human-Earth System Nexus*. In Di Capua G. and Oosterbeek L. (Eds.), *Bridges to Global Ethics*. SpringerBriefs in Geoethics. Springer, Cham, pp. 5-23. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22223-8_2.
- Ripple W.J., Wolf C., Gregg J.W., Levin K., Rockström J., et al. (2022). World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2022. *BioScience*, 72(12), 1149–1155. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac083>

ÁREA TEMÁTICA 1: INVESTIGACIÓN BÁSICA EN GEOCIENCIAS



Condritos carbonáceos tipo CO: Revelando su historia termal

Samanta Aravena-González¹, Daniel Moncada¹, Millarca Valenzuela²⁻³, Rodrigo Martínez⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de ciencias físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(3) Center of Astrophysics and Associated Technologies CATA, Santiago, Chile

(4) Museo del Meteorito, San Pedro de Atacama, Chile

Introducción

Las condritas se componen de matriz y cóndrulos, pequeñas gotas de silicato de composición ferromagnesiana, normalmente de olivino y piroxeno, que revelan complejas texturas. La formación de cóndrulos, ha sido interpretada como el resultado de uno o varios acontecimientos breves de alta temperatura y rápido enfriamiento en un medio gaseoso en los inicios del sistema solar [10]. Hasta la fecha, la historia térmica ha sido fuente de investigaciones y experimentos que buscan estimar las tasas de enfriamiento de los cóndrulos [5,6]. Esta investigación busca aportar en la historia termal de tres muestras de condritos carbonáceos tipo CO, caracterizados por ser muy primitivos, usando espectroscopía Raman y microsonda electrónica.

Metodología

El uso de espectroscopía Raman es favorable para el estudio de moléculas altamente sensibles, pues es una técnica no-destructiva. Además, permite identificar la presencia de las bandas D (1350 cm^{-1}) y G (1580 cm^{-1}) en espectros Raman, las que han sido interpretadas como materia carbonosa presente en la matriz de las condritas [11]. La sensibilidad a la temperatura de la materia carbonosa se expresa en el comportamiento de las bandas en espectros Raman y variadas investigaciones proponen métodos para estimar temperaturas máximas experimentadas por las muestras [1,3,4,12]. También se explora el alcance de la espectroscopía Raman para el estudio de familias de inclusiones vítreas (MIA) encontradas en cóndrulos de olivino [8,9]. Con espectros Raman se interpretaron fases minerales y se estimó el contenido de forsterita de cóndrulos de olivino mediante la relación entre las bandas A (820 cm^{-1}) y B (850 cm^{-1}) [2,7].

Resultados

En este estudio se determinan los sub-tipos petrológicos de las condritas: Catalina 008 (3.4 – 3.7), El Médano 397 (3.7) y Sahara 98067 (>3-6) y se estiman temperaturas máximas de $387\pm 69\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Catalina 008, $402\pm 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ en El Médano 397 y $501\pm 91\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la matriz Sahara 98067. La petrografía de MIAs y los análisis con espectroscopía Raman, permiten interpretar espinela en inclusiones vítreas en un cóndrulo de Olivino Porfírico (PO) de tipo I (>90% Fo). La ocurrencia de inclusiones en un Olivino Barrado, revela altas tasas de enfriamiento; mientras que inclusiones carbonosas en un cóndrulo de Olivino Porfírico-Piroxeno (POP) de tipo II (<90% Fo), revelan temperaturas de formación de $397\pm 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Conclusiones

Este trabajo contribuye en la comprensión de la historia termal de condritas carbonáceas tipo CO, interpretando procesos de formación y procesos secundarios evidenciados en la matriz y cóndrulos con presencia de familias de inclusiones vítreas.

Palabras Clave: Condritos carbonáceos, Inclusiones vítreas, Raman, Microsonda, Temperaturas.

Financiamiento: FONDEQUIP EQM170103 y Proyecto FONDECYT 11170210.

Agradecimientos: Virginia Tech.

Referencias:

- [1] Beyssac, O., Goffe, B., Chopin, C., & Rouzaud, J. N. (2002). Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9), 859–871.
- [2] Bodnar, R. J., & Frezzotti, M. L. (2020). Microscale chemistry: Raman analysis of fluid and melt inclusions. *Elements*, 16(2), 93–98.
- [3] Bonal, L., Bourot-Denise, M., Quirico, E., Montagnac, G., & Lewin, E. (2007). Organic matter and metamorphic history of CO chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(6), 1605–1623.
- [4] Bonal, L., Quirico, E., Flandinet, L., & MoLate Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and Montagnac, G. (2016). Thermal history of type 3 chondrites from the Antarctic meteorite collection determined by Raman spectroscopy of their polyaromatic carbonaceous matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 189, 312–337.
- [5] Connolly Jr, H. C., & Jones, R. H. (2016). Chondrules: The canonical and noncanonical views. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(10), 1885–1899. <https://doi.org/10.1002/2016JE005113>.
- [6] Hewins, R. H., Connolly, H. C., Lofgren, G. E., & Libourel, G. (2005). Experimental Constraints on Chondrule Formation. *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, 341, 286.
- [7] Pittarello, L., Baert, K., Debaille, V., & Claey, P. (2015). Screening and classification of ordinary chondrites by Raman spectroscopy. *Meteoritics and Planetary Science*, 50(10), 1718–1732.
- [8] Roedder, E. (1984a). Occurrence and significance of magmatic inclusions and silicate liquid immiscibility. *Acta Geologica Polonica*, 34(1–2).
- [9] Roedder, E. (1984b). Volume 12: Fluid inclusions. In *Reviews in mineralogy* (Vol. 12).
- [10] Russell, S. S., Connolly Jr., H. C., & Krot, A. N. (2018). Chondrules: Records of protoplanetary disk processes (S. S. Russell, H. C. Connolly Jr., & A. N. Krot, Eds.). Cambridge University Press.
- [11] Sephton, M. A. (2002). Organic compounds in carbonaceous meteorites. In *Natural Product Reports* (Vol. 19, Issue 3, pp. 292–311).

Evaluación del uso de QEMSCAN® como herramienta de mineralogía automatizada para la clasificación de dos condritos ordinarios y los alcances e importancia en la elección de la lista SIP

Thania Beltrán Luna¹, Javiera Flores Rojas¹, Verónica Oliveros Clavijo¹, Millarca Valenzuela Picón²⁻³⁻⁴, Andrew Menzies⁵

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Millenium Institute of Astrophysics, Av Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(4) Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías afines CATA, El Observatorio 1515, Las Condes, Santiago, Chile

(5) Bruker Nano GmbH, Germany, Am Studio 2d, 12489, Berlín, Alemania

Existen diferentes técnicas analíticas que se pueden utilizar para caracterizar mineralógica y químicamente rocas terrestres. Una de ellas es QEMSCAN®, herramienta cuantitativa de mineralogía automatizada no destructiva basada en la combinación de un microscopio electrónico de barrido (SEM) con cuatro detectores de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) y un software de adquisición de datos. Entre sus principales ventajas se destacan la sencilla preparación de las muestras y la generación de mapas en falso color que son útiles para la visualización mineralógica y textural de éstas. Además provee datos geoquímicos semicuantitativos en toda la superficie analizada (sección delgada o briqueta petrográfica), a partir de los cuales se determinan las fases minerales presentes en dicha superficie, sus distribuciones y texturas. En Chile, su uso ha estado dominado por el área de geología económica, sin embargo, desde hace algunos años se ha comenzado a integrar en la meteorítica, principalmente en estudios de condritos ordinarios, en busca de nuevas metodologías para clasificar, debido a la escasez de microsonda electrónica, herramienta que comúnmente se usa para este tipo de análisis.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la utilización de QEMSCAN® para la clasificación petrológica de condritos ordinarios en base a distintos parámetros químicos (por ejemplo, contenido total de Al, Si, Mg, razones de Fe metálico y Fe total) y mineralógicos (% Forsterita vs % Fayalita). Un segundo objetivo es comparar los resultados obtenidos mediante tres "Protocolos de identificación de Especies" (lista SIP) diferentes para el mismo conjunto de datos en dos muestras de meteoritos recolectados en el Desierto de Atacama, región de Antofagasta, Chile. Las muestras corresponden a los condritos PAMPA-A y RM-03, los cuales fueron clasificados previamente como L6/S4/W2 (Pinto, 2017) y H6/S4/W3 (Gattacceca, 2021), respectivamente.

Ambos meteoritos fueron analizados en el laboratorio Qemscan del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción. La base de datos de intensidad de peaks obtenidos con los EDS y de brillo obtenidos mediante el SEM se analiza en una lista SIP que es creada previamente por el usuario y puede ser modificada con posterioridad. Como resultado se obtiene una imagen de falso color en la que cada píxel contiene información de composición química y de la fase mineral identificada. En este trabajo se utilizaron tres listas SIP diferentes. La primera fue creada para la identificación de fases minerales en muestras de depósitos tipo pórfido cuprífero (rocas terrestres) por un equipo de geoquímicos del Instituto GEA de la Universidad de Concepción, y debido a que la lista de minerales presentes no comprende la misma mineralogía que un meteorito, no se pudo llevar a cabo una correcta clasificación de grupo químico. La segunda lista SIP fue diseñada por Andrew Menzies en base a los datos químicos de un condrito ordinario del grupo L. Finalmente, la tercera lista SIP fue diseñada por Flores en base a la intensidad de peaks de un condrito que fue clasificado como ordinario, correspondiente al grupo L/LL. En cuanto al estado de choque (S) y grado de meteorización (W) de las muestras, independiente de la lista SIP utilizada, la clasificación fue S3/W2 (PAMPA-A) y S4/W3 (RM-03), ya que estas características fueron observadas en microscopio óptico, principalmente. Comparando los resultados que se exponen en este estudio con la clasificación previa de las muestras, se puede observar que ninguna se asemeja totalmente, pero la lista que presenta mayor exactitud en la clasificación de los datos obtenidos es la número 3, con una clasificación de H6 para PAMPA-A y L6 para RM-03.

Cabe recalcar que las muestras presentan una heterogeneidad en su composición, PAMPA-A en cuanto a su meteorización (gran cantidad en bordes) y RM-03 en la distribución de sus minerales Fe-Ni metal, lo que puede ser un factor desfavorable para que esta nueva clasificación no coincida con las anteriores.

En conclusión, QEMSCAN® es una herramienta sencilla de utilizar, rápida y eficiente, que permite realizar una clasificación química de meteoritos (grupo químico, tipo petrológico, composición de cóndrulos, matriz y venillas), además de visualizar espacialmente las fases minerales presentes y sus texturas (distribución de meteorización terrestre y efectos de metamorfismo de choque). Sin embargo, estos resultados dependen estrechamente de la lista SIP utilizada y de su calidad. Por ello, se recomienda mejorar la tercera lista SIP o crear una nueva, con el fin de integrar una mayor cantidad de datos, provenientes de distintas muestras, lo cual permitiría eliminar el sesgo propio de la clasificación.

Palabras Clave: Condritos, QEMSCAN, lista, SIP.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT 11171090.

Agradecimientos: Proyecto FONDECYT 11171090. Universidad de Concepción Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción. Universidad Católica del Norte Bruker Nano GmbH.

Referencias:

- Flores, J. 2023. Evaluación de los alcances y limitaciones de la caracterización química y petrológica de condritos ordinarios mediante mineralogía automatizada QEMSCAN®. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 130 pp. Concepción.
- Pinto, G. 2017. Definición, clasificación y emparejamiento de los fragmentos del meteorito PAMPA-A, Pampa de Mejillones, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 157 pp. Antofagasta.
- Gattacceca, J.; Mc Cubbin, F.; Grossmann, J.; Bouvier, A.; Bullock, E.; Chennaoui, H.A.; Debaille, V.; D'Orazio, M.; Komatsu, M. and Miao, B. 2021. The Meteoritical Bulletin, No. 109. Meteoritics and Planetary Science. Vol. 56: 1626-1630.

Estudio petrológico, clasificación y origen de las muestras AV-MO2B y AV-MO8B de meteoritos encontrados en el Desierto de Atacama, Chile

Nicolás Cárcamo¹, Alexandre Corgne¹, Millarca Valenzuela²⁻³⁻⁴, Gabriel Pinto⁵⁻⁶, Alfonso Viera⁷

- (1) Universidad Austral de Chile, Av. Rector Eduardo Morales Miranda 23, Valdivia, Chile
(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
(3) Instituto Milenio de Astrofísica, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
(4) Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines, Camino El Observatorio 1515, Las Condes, Chile
(5) Universidad de Atacama, Instituto de Investigación en Astronomía y Ciencias Planetarias, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile
(6) Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, 15 Rue Notre Dame des Pauvres, Nancy, France
(7) Independiente

Hace una década el Desierto de Atacama comenzó a tomar relevancia como laboratorio natural para el estudio de meteoritos, convirtiéndose en un área óptima de preservación y recolección de meteoritos por sus particulares condiciones climáticas (e.g. clima hiper-árido, fuertes vientos). Así, el repositorio de material extraterrestre recuperado aumenta año a año, por lo que es necesario una correcta clasificación para las muestras encontradas en él. En este trabajo se clasificaron y caracterizaron dos muestras (AV-MO2B y AV-MO8B) correspondientes a dos meteoritos encontrados cerca de la ciudad de Calama, mediante análisis petrográfico, análisis químico puntual y de susceptibilidad magnética. El objetivo de esto es identificar posibles procesos vividos por los meteoritos desde su formación en un cuerpo parental, hasta su evolución durante su estadía en la Tierra. Esto se realizó mediante análisis con un susceptibilímetro magnético, microscopio petrográfico y microscopio electrónico de barrido equipado con un detector EDS para análisis puntuales de química mineral.

Ambas muestras tienen textura condritica, junto a componentes y composiciones químicas que permiten agruparlos como condritos ordinarios. Se componen principalmente de cóndrulos porfíricos y no porfíricos menores (olivino barrado, piroxeno radial, criptocristalino). La matriz de ambas muestras consta principalmente de minerales silicatados como olivinos, piroxenos y feldespatos, junto a metales y sulfuros menores. Los cóndrulos de las muestras AV-MO2B presentan una integración con la matriz, dificultando la estimación de proporciones modales. Además, la química mineral de los cristales (en cóndrulos y matriz) presenta una fuerte homogeneización, evidenciando eventos de reequilibrio químico. Esta muestra por su composición química, susceptibilidad magnética y proporciones de componentes se clasifica como un condrito ordinario del grupo H. Por sus características texturales y la homogeneización en la química mineral se le asigna un tipo petrológico 5.

La muestra AV-MO8B presenta una clara diferencia entre cóndrulos y matriz, con una química mineral muy variable, incluso presentando cristales de silicatos zonados. Esto es evidencia de que no sufrió eventos significativos de reequilibrio. Esta muestra, por su composición química en olivinos (%Fayalita), susceptibilidad magnética y proporción de componentes se clasificó como un condrito ordinario del grupo L. Debido a su textura y la diversidad composicional de sus minerales se le asignó un tipo petrológico entre 3,5 y 3,6, esperando un estudio a detalle (e.g. termoluminiscencia) para una asignación más precisa. La muestra AV-MO2B se presenta apreciablemente meteorizada producto de su estadía en la superficie terrestre. Sin embargo, sus metales no se encuentran completamente alterados, por lo que se le asigna un grado W2. A la muestra AV-MO8B no es posible reconocerle mayores características de alteración, sólo algunos reemplazos de metales menores cercanos al borde de la muestra, por lo que se clasifica con un grado W1.

Para ambas muestras, es difícil estimar el grado de metamorfismo de impacto al solo contar con secciones pulidas, por lo que esto se realizó con base en las características presentes en los minerales opacos. A la muestra AV-MO2B se le asignó un estado de choque S3 debido principalmente a la presencia de vetillas de impacto y el desarrollo de policristalinidad en la troilita. A la muestra AV-MO8B se le asigna un estado S1-S2, por la ausencia de criterios de choque representativos. Se espera poder realizar estudios futuros de texturas de silicatos para afinar esta clasificación.

Luego de la clasificación, fue posible reconstruir una historia geológica para ambas muestras en el cuerpo parental. Ambas provendrían del mismo tipo de asteroides (tipo S(IV)) al ser condritos ordinarios (Gaffey et al., 1993; Nakamura et al., 2011; Vernazza et al., 2015). Sin embargo, se cree que tendrían un cuerpo parental diferente al variar en su grupo químico, teniendo incluso una formación a distinta distancia del Sol (Kuebler et al., 1999; Vernazza et al., 2014). La muestra AV-MO2B, al presentar mayor reequilibrio, se estima que perteneció a Late Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and a a las capas interiores de su cuerpo parental durante el calentamiento en un modelo cáscara de cebolla, mientras que la muestra AV-MO8B a las capas exteriores con un menor metamorfismo termal (Trieloff et al., 2003). Ambas muestras se habrían desprendido de su cuerpo parental probablemente por impactos.

Ambas muestras fueron halladas muy cerca la una de la otra (~4,5 km), por lo que su diferencia en el grado de meteorización se debería principalmente al tiempo de residencia en la Tierra de cada una, siendo la muestra AV-MO2B la que más tiempo llevaría en la superficie terrestre.

Palabras Clave: Meteorito, Condrito, Cuerpo parental, Meteorización, Desierto de Atacama.

Referencias:

- Gaffey M. J. et al., 1993, Icarus, 106, 573. Kuebler K. E. et al., 1999, Icarus, 141, 96.
- Nakamura T., et al., 2011, Science, 333, 1113.
- Trieloff M., et al., 2003, Nature, 422, 502.
- Vernazza P., et al., 2014, The Astrophysical Journal, 791, 120.
- Vernazza P., et al., 2015, Asteroids IV, 617.

A statistical analysis of the weathering of ordinary chondrites from the Calama area, Chile

Nicolás Cárcamo V.¹, Alexandre Corgne¹, Millarca Valenzuela²⁻³⁻⁴, Gabriel A. Pinto⁵⁻⁶

- (1) Universidad Austral de Chile, Av. Rector Eduardo Morales Miranda 23, Valdivia, Chile
 (2) Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (3) Millennium Institute of Astrophysics, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile
 (4) Center of Excellence in Astrophysics and Related Technologies, Camino El Observatorio 1515, Las Condes, Chile
 (5) Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile
 (6) Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, 15 Rue Notre Dame des Pauvres, Nancy, France

Introduction

Over 2000 meteorites have been collected in the Atacama Desert in the last two decades, making it one of the areas with the highest concentration of meteorites in the world. This exceptional concentration is attributed to its hyper-arid climate over millions of years and the absence of human occupation (Gattacceca et al., 2011; Hutzler et al., 2016). The hyper-arid conditions of the Atacama Desert that may have begun ca. 25 Ma ago (Dunai et al., 2005) and have persisted permanently for the last 2-1.5 Ma (Reick et al., 2009; Sáez et al., 2012; Admundson et al., 2013). The Atacama Desert is considered the oldest continuously arid region in the world.

In the Atacama Desert, different populations of meteorites are distributed along various quadrants defined by specific latitude and longitude limits. Depending on the quantity of meteorites collected, this areas can be referred to as Dense Collection Areas (DCAs). Based on the local climate, these areas exhibit varying degrees of meteorite preservation conditions (Bland, 2006; Valenzuela, 2011). Some of the DCAs with the best preservation conditions like Caleta el Cobre and El Médano are located in the Central Depression of the Antofagasta Region (Hutzler et al., 2016). This explains why the El Médano area has provided the oldest collection of meteorites on Earth's surface (Drouard et al., 2019).

Ten years ago, the Calama area had only 10 official meteorites. Due to its particular climatic context, the presence of various human settlements (e.g. Calama, Chiu-Chiu), and mining activities (e.g. Chuquicamata District), the Calama area was considered an unsuitable area for meteorite searching. Currently [1], this area is defined as a DCA because over 350 meteorites have been officially recovered. However, the main DCAs of the Atacama Desert are in Central Depression, which is characterized by an interior desert climate with almost no precipitation, low humidity, and as well as significant temperature variations between day and night (Muñoz et al., 2007; Hutzler et al., 2016). In contrast, Calama has a marginal high desert climate (or cold desert according to the Meteorological Survey of Chile), characterized by altitudes ranging from 2200-2900 m a.s.l. (meters above sea level), generally cold temperatures, and a consistently clear sky. However, there are occasional summer precipitation events (CIREN, 2016).

The ordinary chondrites (OC) are the most abundant meteorites collected in all DCAs of the Atacama Desert and their weathering grades would be used for the analysis of preservation conditions of meteorites along different climatic conditions. It has been proposed that shock degree conditions affect the weathering grade because this directly affects the porosity of OC (Valenzuela, 2011). In this work, we realize a statistical study of the weathering grades of 341 OC (96.3% of total meteorites) of the Calama area. The aim is to compare the different degrees of preservation with finds in other DCAs of the Atacama Desert and to compare the abundance of different chondrites groups of finds and falls in hot deserts.

Methods

The Calama area corresponds to a surface of ca. 2,288 km² and lies E-NE of the city of Calama in the Antofagasta Region, Chile. It has 357 meteorites recorded in the Meteoritical Bulletin Database.

A pairing method (Benoit et al., 2000) was applied to all ordinary chondrite samples to avoid over or under-representation of certain weathering patterns. The following pairing criteria available in the Meteoritical Bulletin Database were used: i) chemical composition, which includes %Fa in olivine and %Fs and %Wo in low-Ca pyroxene; and ii) petrographic characteristics, primarily the petrologic type (Van Schmus and Wood, 1967), shock metamorphism degree (Stöffler et al., 1991), and terrestrial weathering degree (Wlotzka, 1993). For both shock and weathering degrees, a valid range of uncertainty of ± 1 is considered due to the potential lack of representativeness for the entire meteorite (Valenzuela, 2011). Other secondary criteria were the proximity between samples and available petrographic descriptions when applicable.

We applied the scales defined by Wlotzka (1993) and Stöffler et al. (1991) to describe weathering and shock degrees.

Results

The individual weight of the Calama OC ranges from 1.9 g to 32 kg, with ~82% below 300 g and only ~7% with masses >1 kg. After the pairing process, OC accounts for ~95.5% (n=274) of the meteorites associated with the Calama area. A chemical group distribution of 54% H, 38% L, and 3.5% LL chondrite is observed.

Calama OC population displays grades between W1 and W4 (Fig. 1a) with a maximum at W2 (47%). The second major abundance is grades W1 and W3, which represent similar abundances (25 and 24%, respectively). Regarding the distribution as a function of a chemical group (Fig. 1b), the Calama OC shows a similar distribution for H and L, with W2 being the most abundant grade, W4 being the least abundant, and W1 and W3 being intermediate. Interestingly, the W2 abundance is much more significant for the L chondrites (59%) than for the H chondrites (38%), presenting a net difference of $\pm 40\%$ (n=40) with the W1 (20%) and W3 (19%) grades, whereas it is only $\pm 10\%$ (n=13) with the W1 (29%) and W3 (28%) grades of H chondrites. LL chondrites show grades between W1 and W3, with a maximum at W2, but given the low number of samples, a representative quantitative analysis is limited.

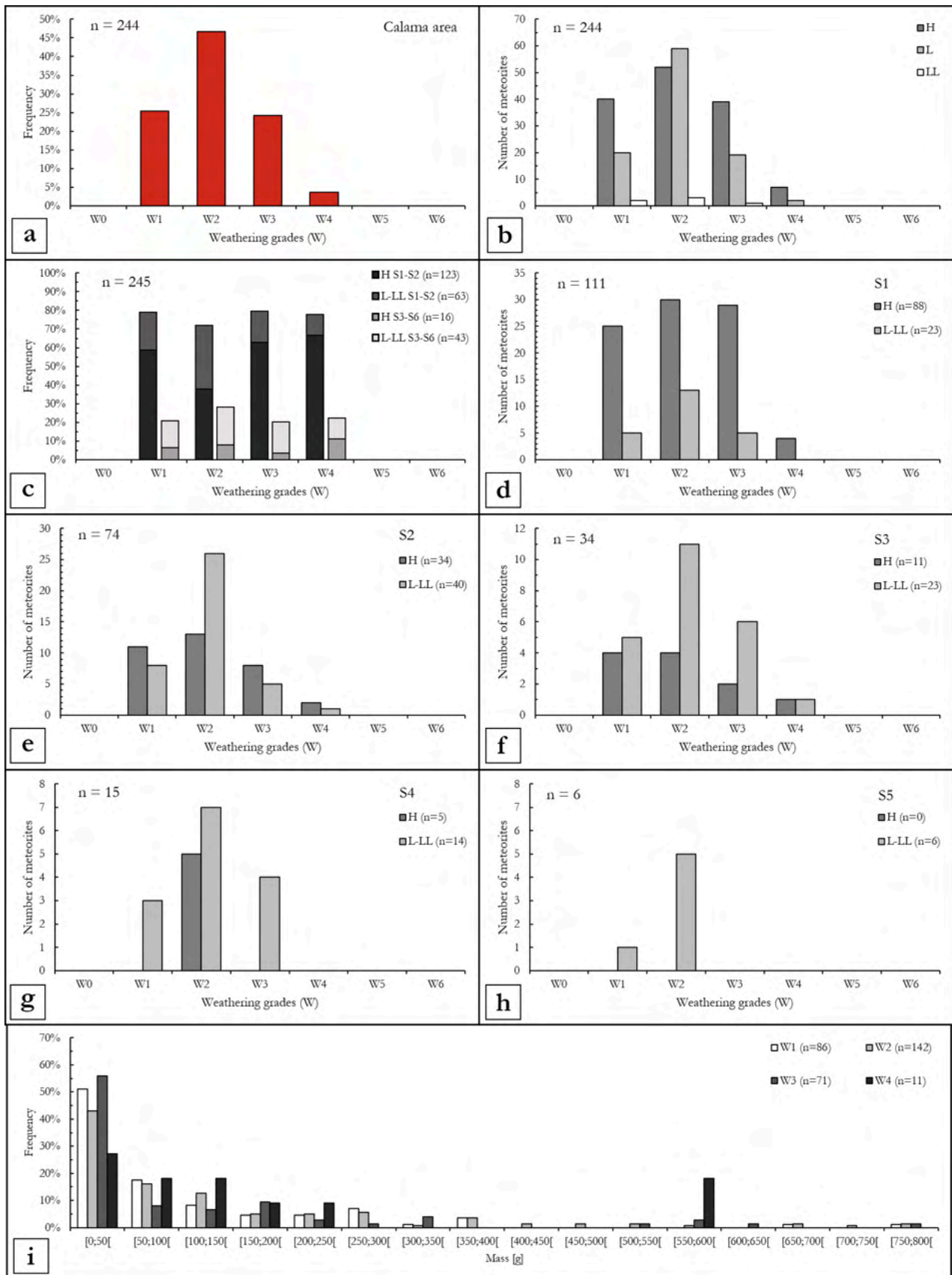


Figure. 1. Frequency distribution histograms of weathering degree for the Calama ordinary chondrites: **a)** general; and **b)** according to their chemical group H, L, and LL. **(c)** Ratio distribution for Calama ordinary chondrites with low (S1-S2) and high (S3-S6) shock states according to their degree of weathering. And frequency distribution for individual shock states **(d)** for S1, **(e)** for S2, **(f)** for S3, **(g)** for S4, and **(h)** for S5. **(i)** Mass distribution for Calama ordinary chondrites according to their weathering degree. Data from Meteoritical Bulletin Database 2023.

The relative proportions of OC with low-shock stages (S1-S2) with respect to those with high-shock stages (S3-S6) tend to remain constant independently of the recorded weathering grade. There is a predominance of low-shock stages (between 72-80%) over high-shock stages (between 20-28%) (Fig. 1c). In detail, however, the distribution of shock stages among H and L-LL chondrites is different.

The modal proportion of H chondrites tends to decrease with increasing shock stage: 64.8% in S1, 24.6% in S2, 8% in S3, 3.6% in S4, and none in S5 (Fig. 1d-h), similar to what has been recorded in other sectors of the Atacama Desert (Valenzuela, 2011). In contrast, L-LL chondrites show a majority of samples with S2 shock stage (37.7%), followed by S1 and S3 stages (21.7% each), S4 stage (13.2%), and S5 stage (5.7%). When plotting the relationship between individual shock stages and weathering grades, it appears that all shock stages reach their maximum abundance for the W2 grade (Fig. 1d-h). All H with S4 stage have a W2 grade (Fig. 1g), while OC with S5 are only L-LL chondrites with W2 and W1 grades (Fig. 1h).

Discussions

The abundance of H chondrites (54%) is significantly higher than that of other hot deserts like Northwest Africa (20.6%) (Ouknine et al., 2019) and current fall statistics (28%). However, it is similar to the reported values for Saudi Arabia (56%) (Hofmann et al., 2018) and slightly lower than other areas within the Atacama Desert like San Juan (60%) (Valenzuela, 2011). The abundance of L chondrites (38%) more closely matches fall statistics (38%) and those of other deserts like Saudi Arabia (37%) (Hofmann et al., 2018). Meanwhile, the LL group (3.5%) exhibits a sub-abundance compared to falls (7%), other hot deserts like Northwest Africa and Saudi Arabia (7-12%) (Ouknine et al., 2019; Hofmann et al., 2018), and slightly lower respect Caleta el Cobre (5.7%) and El Médano (5.5%), but it is similar to the finds in the San Juan area (3.5%).

Calama presents slightly less favorable conditions for the preservation of meteorites than other localities in the Atacama Desert itself. This is evidenced by how the OC show predominantly a W2 weathering degree, while other localities in the Atacama Central Depression like Los Vientos show mostly a W1 degree. A predominance of the W2 degree is also observed in other DCAs of the Central Depression such as San Juan or El Médano, but it is not as strong as observed in Calama, but only slightly greater than the abundance of W1 and W3 degrees. This specific characteristic of Calama OC with respect to other areas of the Atacama Desert may be due to the occurrence of more rainfalls in Calama. However, Calama shares with these other sectors the presence of deflation plains as a result of intense winds. This means that the meteorites do not remain buried for so long, avoiding prolonged contact with weathering agents, such as humidity or salts (Valenzuela, 2011).

The heterogeneous distribution of sample size could potentially bias the relative proportion of weathering grades. This is because samples of large size have a relatively smaller exposed surface (high volume/surface ratio), and thus may be less weathered than samples of smaller size which have a relatively larger exposed surface (low volume/surface ratio). However, since the OC population from Calama shows a fairly homogeneous size/mass distribution, with more than 80% of the OC smaller than 300 g and 44% even smaller than 50 g, a significant sample size bias for weathering analysis is discarded. Furthermore, a similar mass distribution is observed independent of weathering grades. It was noted that in all weathering grades, the number of samples decreases with the increase in mass/size (Fig. 1i).

The relatively high abundance of H chondrites (54%) in the Calama area relative to fall statistics is similar to that observed in Saudi Arabia and other sectors of the Atacama Desert such as San Juan. Furthermore, a high H/(H+L) ratio which is similar to that calculated for hot desert collections (Drouard et al., 2019), would support the hypothesis of a change of flux of incoming chondritic material to Earth (Hutzler et al., 2016). The abundance of H chondrites in Calama would be more representative of earlier stages of accumulation where the H/L ratio was higher than that represented by the current falls (Drouard et al., 2019). Another piece of evidence that could support this hypothesis is the high proportion of H5 chondrites compared to total H (67%), which is much higher than in other hot deserts (33%) and fall statistics (47%). Hutzler et al. (2016) also observed an over-abundance of H5 for the El Médano DCA (46%) respect other hot deserts but explained that this could be because chondrites classified as H5/6 (11.5%) from other hot deserts were not considered in the statistics and that adding them up would lead to a proportion similar to those obtained for El Médano. However, since the proportion of H5 recorded at Calama is remarkably higher, a more likely explanation is that the meteorite flux has not remained constant over time. Additionally, L6 also presents a high abundance concerning the total number of L (58%), this is similar to that recorded in other hot deserts (57%; Hutzler et al., 2016) but is different with respect to fall statistics (66%).

This possible change of flux through time could explain why the L chondrites have a much more significant W2 weathering than the H chondrites, in the case that they mostly accumulated during a period when conditions at Calama were favorable to produce a W2 grade. However, to further constrain this hypothesis, the determination of terrestrial ages for the Calama chondrites is needed.

The result in Fig. 1(c-h) shows evidence that the shock state influences the degree of weathering in Calama OC, similar to previously reported by Valenzuela (2011). Shock directly affects the porosity of OC, hence its exposure to weathering. The fact that the ratio of low-shock to high-shock OC remains constant despite varying weathering grades (Fig. 1c) is rather surprising. A decrease in this ratio could be expected at lower W values because the least weathered samples should have higher shock stages. The relatively low abundance of OC with high-shock stages probably does not allow a significant trend to be produced.

Future perspectives

Determination of exposure ages (e.g. ^{10}Be) for the Calama deflation plains is required to estimate the potential ages of preserved meteorites. It would be also useful to measure terrestrial ages (e.g. ^{36}Cl , ^{14}C) of the different Calama meteorites to constrain further the period of accumulation. Together with a quantitative analysis of the oxidation degree of meteorite components by Mössbauer spectroscopy, it will allow us to define the different weathering patterns over time, identify possible periodicities in the patterns, and link the results to paleoclimatic conditions of the sector. Additionally, Mössbauer spectroscopy would help identify the different weathering products, constrain the conditions to which the Calama meteorites were subjected, and contrast the results with those of

other hot deserts or other areas of the Atacama Desert itself. It would be interesting to assess whether silicate weathering develops at the same time as metal weathering as reported by Valenzuela (2011) for the San Juan DCA, and not later as considered by Wlotzka (1993). In addition, shock stages have not been properly studied in other areas of the Atacama Desert. For example, the Meteoritical Bulletin Database does not record any shock classification for the meteorites of Los Vientos DCA. This work remains to be undertaken to better constrain its influence on weathering.

[1] Meteoritical Bulletin Database, accessed April 2023.

Keywords: Weathering, Ordinary Chondrites, Atacama Desert, Calama.

References:

- Amundson R., et al., 2013, Geological Society of America Bulletin, 124, 1048.
- Benoit P. H., et al., 2000, Meteoritics & Planetary Science, 35, 393.
- Bland P. A., 2006, Journal of Geochemical Exploration, 88, 257.
- CIEN, 2016, Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos.
- Clarke J. D. A., 2006, Geomorphology, 73, 101.
- Drouard A., et al., 2019, Geology, 47, 673.
- Dunai T. J., et al., 2005, Geology, 33, 321.
- Gattacceca J., et al., 2011, Meteoritics & Planetary Science, 46, 1276.
- Hofmann B. A., et al., 2018, Meteoritics & Planetary Science, 53, 2372.
- Hutzler A., et al., 2016, Meteoritics & Planetary Science, 51, 468.
- Muñoz, C., et al., 2007, Journal of Arid Environments, 71, 188.
- Ouknine L., et al., 2019, Journal of African Earth Sciences, 158, 103551.
- Reich M., et al., 2009, Miner Deposita, 44, 497.
- Sáez A., et al., 2012, Earth and Planetary Science Letters, 355-356, 32.
- Stöffler D., et al., 1991, Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 3845.
- Valenzuela M., 2011, Universidad de Chile.
- Van Schmus W. R., Wood J. A., 1967, Geochimica et Cosmochimica Acta, 31, 747.
- Wlotzka F., 1993, Meteoritics, 28, 460.

Evaluación del potencial meteorítico presente en las superficies antiguas del sector sur del desierto de Atacama

Camila Caviedes Cameron¹⁻³, Millarca Valenzuela Picón²⁻³, Mario Soto Vicencio¹, Rómulo Osés Pedraza¹⁻⁴, Kevin Soto Durán²⁻³

(1) Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias, INCT, Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile.

(2) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

(3) Centro de Astrofísica y Tecnologías Asociadas CATA, Camino El Observatorio 1515 Las Condes - Santiago, Chile

(4) Centro Regional de Investigación y Desarrollo Sustentable de Atacama, CRIDESAT. Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile.

Los meteoritos que caen a la Tierra poseen información valiosa para descifrar el origen y evolución del Sistema Solar. En sus minerales y texturas hay claves para entender los procesos involucrados en la formación de planetas, la diferenciación física y química de éstos y la posible emergencia de vida, más allá de la Tierra. Por eso su búsqueda y recolección es muy importante para este tipo de investigaciones.

Algunas áreas terrestres tienen características geomorfológicas y climáticas que permiten la acumulación y preservación de meteoritos [1], siendo el desierto de Atacama uno de los más importantes en el último tiempo.

Las zonas donde se han recuperado meteoritos en Chile se localizan principalmente en la Depresión Central del desierto de Atacama (entre los paralelos 23° - 26° lat sur), debido a su condición de hiperaridez y antigüedad que permite la acumulación de meteoritos en el tiempo. Algunos lugares del desierto de Atacama presentan evidencias de que esta hiperaridez y las bajas tasas de erosión comenzaron hace 25 Ma [2]. En la región de Antofagasta, se han identificado diversas superficies de alta densidad, como son San Juan [3], El Médano [4], Los Vientos, entre otras, con densidades de hasta ~167 met/km² [4], que han permitido el levantamiento de más de 2700 meteoritos registrados [5], siendo los condritos ordinarios el tipo más común de meteorito hallado.

Las superficies antiguas del desierto de Atacama se distribuyen desde el paralelo 19°S al 29°S, y forman un mosaico de paleosuperficies que se les conoce como la Paleosuperficie del Pacífico, las cuales se formaron por procesos de agregación y degradación por más de 19 Ma [6].

La región de Atacama se ubica entre las latitudes 26°S y 29°20'S, y presenta paleosuperficies en el área norte de la región [6]. Actualmente solo 13 meteoritos han sido levantados en la zona sur del desierto de Atacama, y cada uno de ellos representa una caída distinta, siendo la mayoría de los hallazgos de tipo metálico (11), y solo dos de tipo rocoso (un condrito ordinario y un acondrito) [5]. Todos ellos fueron encontrados de manera secundaria en actividades de exploración minera, durante el siglo XIX y mediados del siglo XX. El limitado número de meteoritos y la cantidad anormalmente baja de meteoritos rocosos se puede atribuir a la falta de trabajo de campo específicamente dedicado a la recuperación de meteoritos. Es por ello que usando imágenes satelitales, en conjunto con datos meteoríticos, climáticos y geomorfológicos, se definieron inicialmente 14 superficies que presentan un alto potencial para la recuperación de meteoritos, las cuales serán estudiadas tanto desde sus características geomorfológicas como en el contenido de meteoritos presentes, lo cual se abordará aplicando la metodología de búsqueda sistemática. La primera campaña de campo se realizará en agosto, por lo que se presentarán los resultados de las primeras superficies estudiadas.

Palabras Clave: Meteoritos, Paleosuperficie, Desierto de Atacama.

Financiamiento: Esta investigación cuenta con el financiamiento del Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías Afines CATA, y fondos de Beca de Doctorado Nacional otorgados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo bajo el código ANID-20222072.

Agradecimientos: Agradezco al Centro de Excelencia CATA y a la Agencia Nacional ANID por financiar esta investigación. Y a mis profesores Dra. Valenzuela, Dr. Soto y Dr. Osés por su apoyo y guía.

Referencias:

- [1] Muñoz, C., Guerra, N., Martínez-Frías, J., Lunar, R., Cerda, J., 2007. The Atacama Desert: A preferential arid region for the recovery of meteorites - Find location features and strewnfield distribution patterns. *Journal of Arid Environmental* 71: 188-200.
- [2] Dunai T. J., Gonzalez Lopez G. A., and Juez-Larré J. (2005). Oligocene-Miocene age aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology* 33: 321-324.
- [3] Gattacceca, J., Valenzuela, M., Uehara, M., Jull, T., Giscard, M., Rochette, P., Braucher, R., Suavet, C., Gounelle, M., Morata, D., Munayco, P., Bourrot-Denise, M., Bourles, D., Demory, F. 2011. The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile). *Meteoritics & Planetary Science* 46, Nr 9, 1276-1287.
- [4] Hutzler, A., Gattacceca, J., Rochette, P., Braucher, R., Carro, B., Christensen, E., Cournede, C., Gounelle, M., Laridhi Ouazaa, N., Martinez, R., Valenzuela, M., Warner, M., Bourles, D. 2016. Description of very dense meteorite collection area in western Atacama: Insight into the long-term composition of the meteorite flux of Earth. *Meteoritics & Planetary Science* 51, Nr 3, 468-482.
- [5] Meteoritical Bulletin Database, <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>.
- [6] Muñoz-Farías, S., Ritter, B., Dunai, T., Morales-Leal, J., Campos, E., Spikings, R., Riquelme, R. 2023. Geomorphological significance of the Atacama Pediplain as a marker for the climatic and tectonic evolution of the Andean forearc, between 26° to 28°S. *Geomorphology* 420 (2023) 108504.

Naturaleza y distribución de los depósitos de fragmentación en cráteres de impacto lunar

Ximena Contardo Berríos¹, Roberto Bartali Marchetti²

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota, 980, Viña del Mar, Chile

(2) Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Lateral Av. Salvador Nava s/n. Col. Lomas, San Luis Potosí (SLP), México, 78290

Los cráteres de impacto Lunar han sido cruciales para comprender procesos asociados a la evolución del sistema solar. Sus variadas dimensiones y morfologías se distribuyen sobre corteza anortosítica y basáltica, donde se preservan kilométricas cuencas de impacto evidenciando su interacción con procesos magmáticos y tectónicos durante su formación temprana. En su etapa más tardía, los depósitos de roca y regolito asociado principalmente a estructuras de impacto post Copernicano, proporcionan información de la historia geológica lunar de los últimos ~1,1 Ga. El creciente avance proporcionado por las sondas lunares y sensores remotos, han reforzado significativamente la data geoquímica, morfológica, volumen de roca entre otros, con interrogantes aún no resueltas respecto de la relación entre la morfología del cráter, la mineralogía asociada, la distribución y relación roca/regolito, necesario para comprender mejor las características del impacto y del sustrato afectado. Este estudio intenta comprender la naturaleza y distribución de depósitos asociados a cráteres de impacto lunar, a partir de información obtenida del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Se analizó abundancia de roca/regolito y composición mineralógica de 12 cráteres lunares, simples y complejos. Los de tipo simple, de tierras altas y mares de basalto, presentan diferencias en volumen y distribución de material. Los cráteres complejos, presentan en general variada distribución de detritos principalmente en la cima central y en los bordes, con patrones concéntricos, radiales o irregulares. Se destacan procesos secundarios en la generación de detritos, como fallas activas asociadas a escarpes, conos de deyección y sistemas de fracturas irregulares, entre otros. Los datos espectrales permitieron visualizar variaciones composicionales y asociaciones minerales de los cráteres, consistentes en general, con los basamentos en los que se emplazan, sin embargo, se destacan otros cráteres con composiciones minerales muy contrastantes, asociados principalmente a un aporte meteorítico.

Palabras Clave: Luna, Cráteres de impacto, Mineralogía, Volumen y Distribución depósitos.

Agradecimientos: NASA/GSFC/Arizona State University.

Referencias:

- Bandfield, J.L., Ghent, R.R., Vasavada, A.R., Paige, D.A., Lawrence, S.J., & Robinson, M.S. (2011). Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116 (E12).
- Bart, G. D., and Melosh, H. J. (2007), Correction to "Using lunar boulders to distinguish primary from distant secondary impact craters", *Geophys. Res. Lett.*, 34, L10203, [doi:10.1029/2007GL030402](https://doi.org/10.1029/2007GL030402)
- Crida, A. (2009). Solar System formation. *Reviews in Modern Astronomy* 21, 3008. [doi:10.1002/9783527629190.ch12](https://doi.org/10.1002/9783527629190.ch12).
- Hiesinger, H., & Head, J.W. (2006). New Views of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60, 1-81.
- Melosh, H. J. (1989). *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York: Oxford Univ. Press. 245 pp.
- Bandfield, J.L., Ghent, R.R., Vasavada, A.R., Paige, D.A., Lawrence, S.J., & Robinson, M.S. (2011). Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116 (E12). Kokelaar et al. (2017).
- Lemelin, M., Lucey, P.G., Miljković, K., Gaddis, L.R., Hare, T., & Ohtake, M. (2019). The compositions of the lunar crust and upper mantle: Spectral analysis of the inner rings of lunar impact basins. *Planetary and Space Science*, 165, 230-243. Dhingra, 2018.
- Kokelaar, B. P., Bahia, R. S., Joy, K. H., Viroulet, S., & Gray, J. M. N. T. (2017). Granular avalanches on the Moon: Mass-wasting conditions, processes, and features, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122, 1893–1925. [doi:10.1002/2017JE005320](https://doi.org/10.1002/2017JE005320).
- NASA/GSFC/Arizona State University.

Caracterización petrológica de una nueva ureilita encontrada en la zona de Calama, Región de Antofagasta, Chile

Alexandre Corgne¹, Nicolás Cárcamo¹, Gabriel Pinto², Kevin Soto³, Gaëlle Plissart¹

(1) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

(2) Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

1. Introducción

Las ureilitas son rocas ultramáficas de grano grueso y que componen el segundo grupo más grande de meteoritos no condriticos. Por su mineralogía, textura de equilibrio, composición en elementos litófilos, volátiles y REE, han sido convencionalmente interpretadas como residuos de fusión parcial del manto de un cuerpo parental diferenciado. Sin embargo, su origen sigue en debate debido a la dificultad de explicar estas características de rocas ígneas diferenciadas con ciertas propiedades primitivas tales como su alto contenido en carbono, gases nobles y elementos siderófilos, además de sus composiciones isotópicas de O (Goodrich, 1992; Weisberg et al., 2006; Rubin, 2006). Mineralógicamente se componen de olivinos y piroxenos (principalmente bajo en Ca) interconectados con fases intersticiales de carbono y menores metales, sulfuros y silicatos (Weisberg et al., 2006; Krot et al., 2014). Se distinguen tres grupos principales, las ureilitas de olivino-pigeonita ($Wo_{\sim 7-13}$), de olivino-ortopiroxeno ($Wo_{<5}$) y las polimícticas. Solo algunas ureilitas polimícticas tienen feldespatos (Goodrich, 1992; Goodrich et al., 2004; Weisberg et al., 2006). Los cristales de olivino y piroxenos suelen presentarse como gruesos granos con límites bien redondeados y típicas triples uniones a 120°, en algunos casos con fábricas y foliación (Goodrich, 1992; Weisberg et al., 2006; Krot et al., 2014). El origen de la diversidad de composición de las ureilitas, en particular el Mg# de los silicatos y la composición isotópica de O, así como el significado de las temperaturas de equilibrio, sigue sujeta a debate. Aún no hay un modelo petrogenético consensuado para explicar su historia en su(s) cuerpo(s) parental(es) (Singletary & Grove, 2003; Goodrich et al., 2004; Mittlefehldt et al. 2005; Warren & Huber, 2006; Downes et al., 2008; Warren, 2012; Goodrich et al., 2015; Rai et al., 2020).

Una de las características particulares de las ureilitas es la presencia de las fases de carbono (3 %peso en promedio), que ocurren principalmente de forma intersticial en los silicatos. Estos pueden estar presentes mayoritariamente como grafito, pero en menor grado como diamante, carbono amorfo u orgánico, carburos, cohenita o lonsdaleíta (Berkley et al., 1976; Goodrich, 1992; Day et al., 2016). El origen de estas fases de carbono se estima como una etapa de adición tardía, después de una pérdida de silicato y sulfuros por fusión parcial, evidenciado por las zonas de reducción localizadas (Day et al., 2016). Dentro de estas fases de carbono se presentan los diamantes, que suelen aparecer con tamaños desde nanómetros hasta milímetros (Jakubowski et al., 2011). El origen de estos diamantes ha sido ampliamente debatido y sigue siendo un problema para resolver (Day et al., 2016). Se han propuestos tres distintos posibles orígenes para estos minerales en las ureilitas: i) transformación del grafito a partir de metamorfismo de choque al impactar con la Tierra o en la fragmentación del cuerpo parental (Lipschutz, 1964; Nakamura y Aoki, 2000; Hezel et al., 2008; Le Guillou et al., 2010; Nakamura et al., 2016; Lorenz et al., 2019; Nestola et al., 2020; Barbaro et al., 2021); ii) crecimiento a alta presión en el cuerpo parental (Urey, 1956; Miyahara et al., 2015; Nabie et al., 2018); y iii) formación a baja presión en la nebulosa solar por la deposición química a partir de un vapor (Fukunaga et al., 1987; Matsuda et al., 1991; Matsuda et al., 1995; Nagashima et al., 2012).

El objetivo de este trabajo es generar una descripción petrográfica y geoquímica de una nueva ureilita encontrada en el Desierto de Atacama, cerca de Calama. Hasta la fecha, solo nueve ureilitas chilenas han sido registradas oficialmente en la base de datos del Meteoritical Bulletin, incluyendo tres en la zona de Calama. Este nuevo descubrimiento ofrece la oportunidad de aportar a los distintos debates antemencionados sobre el origen de estas litologías muy particulares.

2. Muestra y Metodología

Se recolectaron tres fragmentos del meteorito dentro de una distancia de 50 cm, en el Cuadrante Calama a ~20 km al este de la ciudad de Calama. La masa total alcanza 860 g, con masas individuales de 615, 169 y 76 g. Este meteorito (código de trabajo MET21-02) corresponde a la segunda masa total más elevada reportada para una ureilita chilena, después de Catalina 037 (2,22 kg en 100 fragmentos). Se prepararon secciones pulidas y láminas delgadas de la muestra para las observaciones petrográficas y los análisis de química mineral.

La densidad fue medida por el método de desplazamiento de agua. Las descripciones petrográficas fueron realizadas con un microscopio óptico Zeiss Axiolab 5. Se realizó un conteo de puntos con el software JMicroVision para estimar las proporciones modales de los componentes de la muestra. La observación de micro-texturas y los análisis químicos puntuales fueron realizados en un microscopio electrónico de barrido (SEM) Zeiss EVO MA10 combinado con un detector de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) Oxford Instrument de la Unidad de Microscopía Electrónica de la Universidad Austral de Chile. Se analizaron distintas fases minerales silicatadas: olivinos ($n=29$) y piroxenos ($n=20$); y opacas: Fe-Ni metálico ($n=1$) y oxihidróxidos de Fe ($n=13$). Se obtuvieron también mediante uso SEM distintas imágenes de electrones retrodispersados (BSE) y de electrones secundarios. Las fases de carbono fueron también analizadas por SEM-EDS y con un microscopio confocal Raman WITec Alpha 300 RA equipado con un láser de 532 nm de longitud de onda (energía de 10 mW) del Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos de la Universidad Austral de Chile.

3. Resultados

3.1. Propiedades físicas: Los 3 fragmentos recolectados están muy consolidados y con una superficie pulida por abrasión eólica y sin costra de fusión preservada.

La densidad de las muestras es de aproximadamente $3,3 \pm 0,1$ kg/m³, es decir dentro del rango esperado para ureilitas (e.g. Macke et al., 2011). El corte de la muestra con un disco diamantado resultó difícil de realizar, lo que indica la presencia de un componente duro (diamante).

3.2. Petrografía: MET21-02 es una ureilita del grupo olivino-pigeonita. Está compuesto principalmente de cristales anhedrales a subhedrales de olivino (~50 %vol) y pigeonita (~25 %vol) interconectados de grano fino a medio (0,5-2 mm) con abundantes triple uniones a 120° y sin una orientación preferencial (Fig. 1a). Estos cristales de olivino y pigeonita exhiben bordes reducidos de espesor variable hasta ~100 µm. Algunos granos de olivino y pigeonita muestran una débil extinción ondulada y fracturas rectilíneas. También se observa algunos granos de silicatos maclados, principalmente la pigeonita y raramente en olivino. No se observaron pliegues kink ni mosaicismo en olivinos. Estas características estructurales en los silicatos indicarían un grado de choque moderado. En los límites de los silicatos se presenta una red interconectada de oxi-hidróxidos de Fe (~15 %vol) que contiene rara kamacita y tiene un espesor de hasta 20 µm. Estos oxi-hidróxidos de Fe también se presentan como manchones micrométricos (~5 %vol) en los bordes de los silicatos, principalmente en los olivinos. Agregados intersticiales de fases de carbono (grafito y diamante) están también ampliamente presentes (~5 %vol). Se presentan como masas de hasta 200 µm de tamaño distribuidas de forma intersticial entre los granos de silicatos en contacto con los bordes reducidos. Las fases son típicamente micrométricas y raramente superan los 10 µm. Las mediciones Raman presentan *peaks* a los 1330, 1355, 1580 y 2710 cm⁻¹ que indican la existencia de diamantes y grafito (Fig. 1b). No se observaron grandes escamas de grafito como en otros ureilitas encontradas en el Desierto de Atacama (e.g. Calama 001, Catalina 037). Particularmente, Catalina 037 se diferencia de MET21-02 debido a que la primera ha sido clasificada como una ureilita polimítica con feldespato, augita y sin diamante.

3.3. Composición química: Los granos de olivino presentan una zonación química respecto a sus contenidos de Mg-Fe, con los núcleos (n=10) más ricos en Fe ($Fa_{21,3 \pm 0,7}$; FeO %peso / MnO %peso = $40,2 \pm 3,9$) y sus bordes (n=17) más ricos en Mg (entre $Fa_{15,5}$ y $Fa_{2,5}$; FeO %peso / Mn %peso entre 5,5 y 22,5). Algunos elementos menores en los núcleos de olivino son $0,74 \pm 0,08$ %peso de Cr_2O_3 , $0,33 \pm 0,05$ %peso de CaO y $0,50 \pm 0,05$ %peso de MnO . Las pigeonitas también presentan una zonación química asociada a su contenido de Mg-Fe, con núcleos (n=7) más ricos en Fe ($En_{72,3 \pm 0,5}$ $Wo_{9,8 \pm 0,2}$ $Fs_{17,8 \pm 0,5}$) y con bordes (n=12) más ricos en Mg (hasta $En_{83,7}$). Los núcleos de la pigeonita contienen $1,28 \pm 0,10$ %peso de Cr_2O_3 y $0,50 \pm 0,10$ %peso de MnO . Los contenidos en Ca en los núcleos son bastante homogéneos, al contrario de los bordes donde varían ampliamente ($Wo_{4,5-21,4}$). Solo se registró un grano metálico intersticial de kamacita de 50 µm de ancho y con 4,2 %peso de Ni y 0,4 %peso de P. Gran parte del material intersticial corresponde a oxi-hidróxidos de Fe con variable contenidos de Cl (3-4 %peso) y otros elementos menores (Ni, Mg, Si, P y S).

4. Discusión

Otras tres ureilitas (Calama 001, 158 y 256) han sido encontradas en la proximidad de MET21-02, por lo que es importante revisar un posible pareamiento entre estas muestras. Calama 001 fue encontrada a unos 3 km de distancia. Según la descripción entregada en la base de datos del Meteoritical Bulletin (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>), Calama 001 fue fácilmente cortada con una sierra diamantada (a diferencia de MET21-02), contiene grandes escamas de grafito (hasta 1 mm) y no se observan diamantes. Los núcleos de los olivinos tienen una composición de $Fa_{11,2}$, $FeO/MnO = 20,5$, y $0,53$ %peso de Cr_2O_3 , y los piroxenos corresponden a augita ($Fs_{6,3}Wo_{37,1}$) y piroxeno bajo en Ca ($Fs_{10,8}Wo_{4,8}$). Debido a las diferencias en mineralogía y las diferencias composicionales en olivinos y piroxenos (más pobres en Fe), se descarta que exista un pareamiento entre Calama 001 y MET21-02. Por otra parte, Calama 256 fue encontrada a 6 km de distancia y presenta similitudes petrográficas y geoquímicas con MET21-02. Pero a diferencia de MET21-02, contiene pigeonita netamente más empobrecida en Fe y Ca ($Fs_{10,1}Wo_{2,4}$) y también contiene augita. Los núcleos de olivino tienen %Fa parecido a MET21-02, pero contienen significativamente menos Cr y Ca. Por lo anterior, se descarta pareamiento. Finalmente, Calama 158 fue encontrada a 10 km de distancia y también presenta similitudes petrográficas con MET21-02. Sin embargo, contiene bastante más olivino (80%). Los núcleos de olivino son ligeramente más pobres en Fe (Fa_{18}) y con mayor Fe/Mn (46,1). Los núcleos de pigeonita son químicamente distintos a los de MET21-02 al ser más ricos en Fe y pobres en Ca ($Fs_{21,9}Wo_{6,6}$). Por lo tanto, se descarta también un posible pareamiento.

La deposición química de vapor en la nebulosa y el crecimiento a alta presión en el cuerpo parental han sido propuestos como procesos formadores de diamantes en ureilitas. Sin embargo, la coexistencia del diamante con grafito y la presencia de silicatos deformados en la ureilita estudiada favorece al modelo alternativo de formación por choques. La ocurrencia de diamantes es típicamente más frecuente en los estados de choque mayores a S4. El estado de choque estimado para MET21-02 es aprox. S3 según la clasificación de Stöffler et al. (1991). La ausencia de mayores grados de choque registrados por los silicatos en la muestra estudiada es coherente con la preservación de grafito. También podría indicar un proceso de recristalización post-impactos de los silicatos, lo cual borraría texturas de deformación, y sería posiblemente favorecido por metamorfismo termal en el cuerpo parental (Rubin, 2006). Alternativamente, el rol catalítico de aleaciones de Fe-Ni provee otro mecanismo para el crecimiento de micro-diamantes en ureilitas moderadamente deformadas como MET21-02 (Barbaro et al., 2021).

Las figuras 1c y 1d muestran correlaciones lineales entre razones atómicas de Fe/Mg, Fe/Mn y Fe/Cr en ureilitas. Estas correlaciones indican un grado variable de reducción in-situ de los granos de olivino en contacto con fases de carbono, como evidencian los bordes de reducción característicos de las ureilitas (e.g. Goodrich et al., 2014). Respecto a las otras ureilitas, MET21-02 presenta altas razones, es decir una relativamente baja reducción. Por lo tanto, se clasifica dentro de las ureilitas ferroanas. Varios modelos han tratado de explicar el proceso de reducción de las ureilitas y las variaciones en Mg# (o Fe/Mg) de los núcleos de olivino. Ha sido asignado a *smelting*, es decir reducción por las fases de carbono durante fusión parcial (Singletary & Grove, 2003; Goodrich et al., 2004). Otros autores descartan el modelo de *smelting* en base a la ausencia de correlación entre el Mg# y el contenido de otros elementos siderófilos. Prefieren considerar que la diversidad de Mg# se debe a heterogeneidades en el protolito antes de sufrir fusión parcial (Mittlefehldt et al. 2005; Warren & Huber, 2006). Actualmente no hay consenso sobre la importancia del proceso de *smelting*.

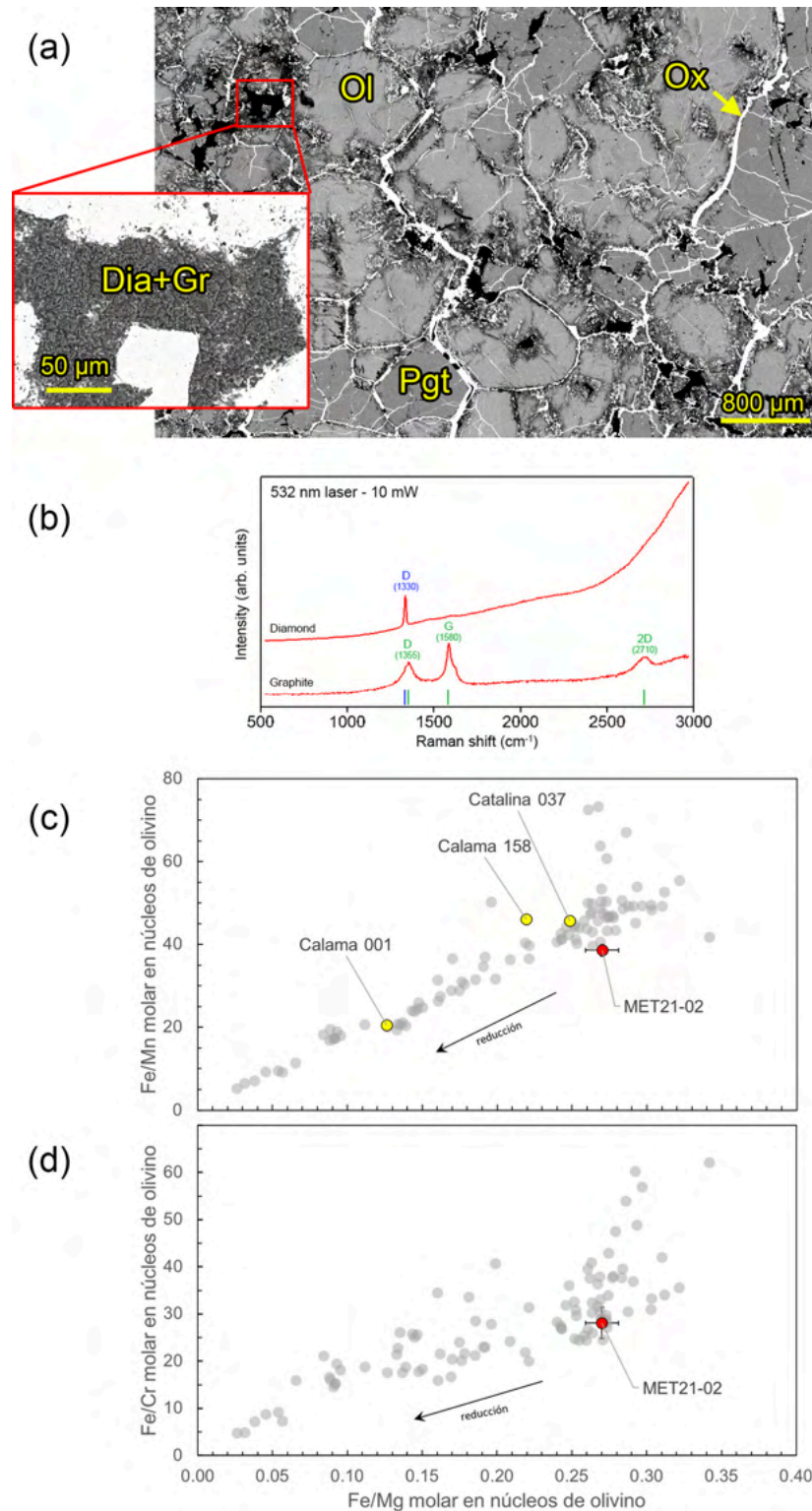


Figura 1. (a) Imagen BSE mostrando las características texturales y mineralógicas típicas de la nueva ureilita (ver descripción en el texto principal). Abreviaciones: Ol, olivino; Pgt, pigeonita; Ox: oxi-hidróxidos de Fe, Dia, diamante; Gr, grafito. **(b)** Espectro Raman de las fases de carbono revelando la presencia de diamante y grafito. **(c)** Razones molares Fe/Mn vs. Fe/Mg en núcleos de olivino de las ureilitas, destacando el efecto del proceso de reducción (flecha negra) y las razones obtenidas para la nueva ureilita (MET21-02) y otras ureilitas chilenas. **(d)** Razones molares Fe/Cr vs. Fe/Mg en núcleos de olivino de las ureilitas, destacando las razones de la nueva ureilita (MET21-02). No se ha reportado Fe/Cr para las otras ureilitas chilenas.

Sin embargo, hay consenso sobre que la reducción de los granos de olivino ocurrió durante una descompresión violenta a alta temperatura, probablemente asociada a un impacto de gran magnitud que destruyó el cuerpo parental y puso fin al magmatismo (e.g. Downes et al., 2008).

En el caso de MET21-02, se puede estimar una temperatura de 1.233 ± 20 °C de equilibrio antes de la formación de los bordes de reducción a partir del geotermómetro propuesto por Singletary & Grove (2003) basado en la composición de la pigeonita. Esta estimación cae en la media del rango de valores reportados en la literatura (1.150-1.300 °C) y es coherente con el contenido en forsterita (Fe_{79}) del olivino y la proporción modal de pigeonita (25%) esperada en la muestra si representa un residuo de fusión. Sin embargo, estos resultados no respaldan la propuesta de Singletary & Grove (2003) que las ureilitas con baja proporción de pigeonita y de mayor temperatura de equilibrio Late Neogene terrestre climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and son las más reducidas (y con bordes de granos difusos). A pesar de tener una temperatura de equilibrio no tan baja y un volumen bajo a moderado de pigeonita (25%), la ureilita estudiada presenta un relativamente bajo grado de reducción, bordes de reducción moderadamente desarrollados y bordes de granos netos (Fig. 1a). En el caso de considerar el modelo de *smelting* para el origen de los bordes de reducción, nuestras observaciones implican que la relación entre grado de *smelting* y temperatura no es siempre directa y que otros factores deben ser considerados. Una posibilidad podría ser la cantidad de fases de carbono a disposición para realizar la reducción. Sin embargo, la muestra estudiada parece contener una proporción de fases de carbono dentro de lo normal, por lo que en este caso no explicaría su enriquecimiento relativo en Fe. Otra posibilidad es que la muestra estaba ubicada a niveles someros en el cuerpo parental. Una baja presión frena la reducción debido a que el proceso de *smelting* es sensible a la presión de confinamiento del gas CO/CO₂ producido durante la reacción (Singletary & Grove, 2003). Sin embargo, la muestra estudiada probablemente no viene de niveles muy someros porque se esperaría que contenga feldespatos y presente elevados grados de choque.

Además de análisis de química mineral por microsonda electrónica, futuros estudios de MET21-02 incluyen una caracterización más detallada de las fases de carbono por microscopía electrónica y espectroscopía Raman, específicamente para determinar las relaciones microtexturales entre grafito y diamante y las distribuciones de tamaño. También se contempla determinar la temperatura máxima alcanzada por el grafito ocupando el geotermómetro de Cody et al. (2008) basado en el ancho de la banda G del espectro Raman. Eso permitirá entender mejor la historia térmica de la muestra. Por otro lado, se espera desarrollar análisis de moléculas orgánicas para poder identificar la naturaleza de los aminoácidos extraterrestres potencialmente presentes en la ureilita. Permitirá complementar el estudio de Burton et al. (2012), quienes evidenciaron la predominancia de ciertos tipos de aminoácidos en meteoritos alterados térmicamente, incluyendo ureilitas. Finalmente, se contempla determinar el contenido en REE de los silicatos de MET21-02 para confirmar su origen como restita luego de la extracción de un magma basáltico y evaluar el nivel de desequilibrio entre olivino y pigeonita.

Palabras Clave: Ureilita, Meteoritos, Calama, Diamante, Petrología.

Financiamiento: Estudio financiado por el Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile.

Agradecimientos: Se agradece el apoyo analítico institucional por parte de la Unidad de Microscopía Electrónica (SEM-EDS) y de la Dra. Loreto Troncoso del Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos (Raman).

Referencias:

- Barbaro A., et al., 2021. *Geochim. Cosmochim. Acta* 309, 286.
- Berkley J.L., et al., 1976. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 1429.
- Burton A.S., et al., 2012. *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 374.
- Cody G.D., et al., 2008. *Earth Planet. Sci. Lett.* 272, 446.
- Day J.M.D., et al., 2016. *Geochim. Cosmochim. Acta* 198, 379.
- Downes H., et al., 2008. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 4825.
- Fukunaga K., et al., 1987. *Nature* 328, 141.
- Goodrich C.A., 1992. *Meteoritics* 27, 327.
- Goodrich C.A., et al., 2004. *Chemie de Erde* 64, 283.
- Goodrich C.A., et al., 2014. *Geochim. Cosmochim. Acta* 135, 126.
- Goodrich C.A., et al., 2015. *Meteorit. Planet. Sci.* 50, 782.
- Hezel D.C., et al., 2008. *Meteorit. Planet. Sci.* 43, 1127.
- Jakubowski T., et al., 2011. *Meteorites* 0, 3.
- Krot A.N., et al., 2014. *Treatise Geochemistry Second Ed.* 1, 1.
- Le Guillou C., et al., 2010. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4167.
- Lipschutz M.E., 1964. *Science* 143, 1431.
- Lorenz C.A., et al., 2019. *Meteorit. Planet. Sci.* 54, 1197.
- Macke R.J., et al., 2011. *Meteorit. Planet. Sci.* 46, 311.
- Matsuda J., et al., 1991. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 2011.
- Matsuda J., et al., 1995. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 4939.
- Mittlefehldt D.W., et al., 2005. *Lunar Planet. Sci. Conf. XXXVI*.
- Miyahara M., et al., 2015. *Geochim. Cosmochim. Acta* 163, 14.
- Nabiei F., et al., 2018. *Nat. Commun.* 9, 1.
- Nagashima K., et al., 2012. *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 1728.
- Nakamura Y. & Aoki Y., 2000. *Meteorit. Planet. Sci.* 35, 487.
- Nakamura Y., et al., 2016. *J. Mineral. Petrol. Sci.* 111, 252.
- Nestola F., et al., 2020. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117, 25310.
- Rai N., et al., 2020. *Geochemical Perspect. Lett.* 14, 20.
- Rubin A.E., 2006. *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 125.
- Singletary S.J. & Grove T.L., 2003. *Meteorit. Planet. Sci.* 38, 95.
- Stöffler D., et al., 1991. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 3845.
- Urey H.C., 1956. *Atrophys. J.* 124, 623.
- Warren P.H., 2012. *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 209.
- Warren P.H. & Huber, H., 2006. *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 835.
- Weisberg M.K., et al., 2006. *Meteorites and the Early Solar System II*, pp. 19.

Clasificación y análisis de las muestras de meteorito CAT-M2-2021 y AV-M03B, encontradas en el Desierto de Atacama, Región de Antofagasta, Chile

José Aaron Jesús Duarte Vergara¹, Millarca Valenzuela Picon¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

El Desierto de Atacama con su extrema aridez, con zonas que no presentan erosión desde hace 23 Ma (Dunai et al., 2005) presenta condiciones muy favorables para la conservación de meteoritos. En los últimos años, se ha convertido en un sitio de interés para la búsqueda y estudio de estos materiales. Esto ha llevado a un incremento considerable en la cantidad de meteoritos encontrados en Chile, por lo que se hace necesario el uso de técnicas que permitan su rápido análisis y clasificación. Bajo esta problemática, se alza como una posible solución el análisis QEMSCAN. Según sus características petrográficas, mineralógicas y geoquímicas, es posible clasificar los meteoritos en distintos grupos.

El objetivo general de este trabajo de tesis consiste en determinar la clasificación de dos meteoritos: CAT-M2-2021 y AV-M03B, encontrados en el Desierto de Atacama, utilizando esquemas de clasificación vigentes (Van Schmus y Wood, 1967; Stöffler et al. 1991; Wlotzka 1993; Valenzuela 2011; Rochette et al. 2012), y la técnica analítica QEMSCAN, para evaluar su desempeño como herramienta para la clasificación de meteoritos; y con respecto a la clasificación obtenida inferir características de un posible cuerpo parental. Para esto, se realizaron medidas de la susceptibilidad magnética ($\log \chi$) de cada muestra, además de descripciones de cortes delgados utilizando microscopía de luz reflejada y transmitida.

Los resultados indican que los meteoritos representados por las muestras CAT-M2-2021 y AV-M03B corresponden a condritos ordinarios. El condrito representado en CAT-M2-2021 pertenece al grupo químico H, con una susceptibilidad magnética en $\log \chi$ de 5,098. El análisis QEMSCAN nos indica que su composición elemental principal es Fe (28,35%), Si (15,45%), Mg (13,23%), Ni (2,2%) y Ti (0,04%). Su mineralogía es principalmente Olivino (32%), Piroxeno (29%), Kamacita (15%). Troilita (5%), Cromita (1%). Las evidencias observadas en sus componentes corresponden con un tipo petrológico 4, estado de choque S2 y grado de meteorización W1. Esta muestra presenta microfallas con desplazamiento observable, sin embargo, la magnitud del desplazamiento en estos componentes varía dentro de la misma microfalla. Por su parte, el condrito representado AV-M03B también pertenece al grupo químico H, con una susceptibilidad magnética en $\log \chi$ de 4,847. Su mineralogía principal está compuesta por Piroxeno (32%), Olivino (26%), Kamacita (10%), Troilita (3%) y Plagioclasa (2%). Las evidencias en sus componentes permiten clasificarlo en un tipo petrológico 5, estado de choque S2 y un grado de meteorización diferenciado, W1 para su centro, y W3 para su exterior.

La información obtenida del análisis elemental QEMSCAN resultó ser de gran valor para aplicar diagramas de clasificación que permitieron reforzar y respaldar la clasificación de grupo químico obtenido por susceptibilidad magnética. Sin embargo, con respecto a parámetros como el estado de choque, y meteorización terrestre no nos entrega información concluyente. Es necesario seguir afinando la configuración de la lista SIP para evitar incongruencias que se presentan en la identificación de ciertos minerales. El desarrollo de esta metodología y su validación sería un importante hito para el desarrollo de la meteorítica en Chile.

En cuanto a su origen, ambas muestras provendrían de un asteroide tipo S, siendo afectadas por metamorfismo termal en distintos grados, alcanzando temperaturas de 600 – 700 °C para CAT-M2-2021 (H4) y 700 – 800 °C para AV-M03B (H5); y eventos de choque que significaron presiones de 5 – 10 GPa y un incremento en la temperatura de 20 a 50 °C.

Palabras Clave: Condritos ordinarios, Petrografía, QEMSCAN, Susceptibilidad magnética, Clasificación.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT N°11171090 (investigadora principal Dra. Millarca Valenzuela) el cual financió este trabajo de tesis.

Agradecimientos: A Alfonso Viera por la donación de la muestra AV-M03B analizada en esta tesis. Al Dr. Renato Acosta Flores y a MAINI de la UCN, por el análisis QEMSCAN realizado a la muestra CAT-M2.

Referencias:

- Dunai, T. J., González López, G. A., & Juez-Larré, J. (2005). Oligocene- Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33(4), 321–324.
- Rochette, P., Gattacceca, J., & Lewandowski, M. (2012). Magnetic classification of meteorites and application to the Soltmany fall. *Meteorites*, 2(1–2).
- Stöffler, D., Keil, K., & Edward R.D. S. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845–3867.
- Valenzuela, E. M. (2011). Procesos de Meteorización en Condritos Ordinarios del Desierto de Atacama, Norte de Chile: Nuevos Antecedentes sobre Meteorización de Material Extraterrestre en Ambientes Desérticos. Tesis de grado de Doctor en Ciencias mención Geología. (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 291 p.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5).
- Wlotzka, F., 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics* 28 (3), Abstract, 460.

Microfallas en Condritos Ordinarios: Evidencias e implicaciones

José Aaron Jesús Duarte Vergara¹, Millarca Valenzuela Picon¹, Craig Walton²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Trinity College, Institute of Astronomy, University of Cambridge, CB21TQ, Cambridge, Reino Unido

Los meteoritos del tipo condrito ordinario son los más comunes encontrados. Según sus características químicas y petrográficas estos pueden ser clasificados según los siguientes parámetros: Grupo químico, tipo petrológico, estado de choque y estado de meteorización (Van Schmus y Wood, 1967; Stöffler et al. 1991; Wlotzka 1993; Valenzuela 2011; Rochette et al. 2012). Sin embargo, en ninguno de los parámetros de clasificación actuales se considera la presencia de microfallas como característica a considerar para brindar una clasificación. Al realizar una búsqueda en la bibliografía actual es posible notar una ausencia de publicaciones que analicen estas estructuras con detalle, siendo una de ellas Krzesińska et al., (2015) que describe las microfallas presentes en el condrito de Pułtusk y un poster de Walton y Anand (2017) que hacen notar la rareza de estas estructuras y se plantean la pregunta de su significancia.

Con la intención de saber qué porcentaje de muestras de meteoritos contienen este tipo de estructuras, se estudiaron petrográficamente 91 muestras de meteoritos del tipo condritos ordinarios, provenientes de diversas expediciones científicas al Desierto de Atacama, Región de Antofagasta; como también de donaciones de coleccionistas privados, provenientes de la misma zona. De estas 91 muestras (31 cortes delgados, 52 briquetas y 8 fragmentos) 9 presentaban evidencia de microfallas (6 briquetas y 3 cortes delgados): J337A, JG124, JP002, M338B, M396, M690, P319, RM-01 y CAT-M2-2021.

El bajo porcentaje de muestras que presentan estas estructuras se puede asociar a la dificultad de preservación de éstas en fragmentos tan pequeños, tomando en cuenta escenarios de formación de estas microestructuras en procesos de impacto relacionados con sus cuerpos parentales.

La clasificación de estos meteoritos, hasta ahora, no presenta evidencia de estados de choque avanzados. De dichas muestras, de la que se tiene mayor información es la muestra CAT-M2-2021, la que se encuentra clasificada como H4 S2 W1, y a su vez es la que presenta las microfallas más notables. La morfología de estas estructuras, su longitud (de unos pocos mm hasta sobrepasando el centímetro), desplazamiento (0,1 mm - 0,3 mm en promedio; con casos llegando hasta 0,7 mm), y relación entre distintas estructuras en una misma muestra es muy variable; se observaron casos de microfallas con desplazamiento limpios y sin signos aparentes de deformación (ej. M396; RM-01), como también otras con alto grado de deformación y material desgarrado debido al cizallamiento (ej. J337A), el cual se extiende a través del plano de falla (ej. JP002); microfallas de gran extensión (ej. 1,2 cm en CAT-M2-2021; 0,9 cm en JP002) que interconectan, como también múltiples microfallas esparcidas por la muestra sin aparente relación entre sí (ej. 5 en M690 y M338B).

Estas características y su variabilidad pueden ser un registro de los acontecimientos de choque en los cuerpos parentales de estas muestras, o bien herencias de sus estructuras, y pueden entregarnos información acerca de las condiciones en que estos ocurrieron en la historia temprana del sistema solar.

El estudio de microfallas en meteoritos y su posible relación con los distintos parámetros de clasificación de estos, es un campo que aún no se ha explorado, y por lo mismo, el estudio e identificación de este tipo de estructuras en distintos meteoritos podría llevarnos a generar asociaciones que nos permitan comprender de mejor manera la naturaleza de estas y sus procesos de formación, como también relacionarla como un nuevo aspecto a considerar a la hora de otorgarle una clasificación a un condrito ordinario.

Palabras Clave: Condritos ordinarios, Microscopía óptica, Microfallas, Procesos de impacto, Petrología.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT N°11171090 (investigadora principal Dra. Millarca Valenzuela) el cual financió mi trabajo de tesis que dio lugar a esta investigación posterior.

Agradecimientos: al Departamento de Ciencias Geológicas de la UCN y al Dr. Shoji Kojima por la disposición del microscopio utilizado para analizar petrográficamente las muestras de este estudio.

Referencias:

- Krzesińska, A., Gattacceca, J., Friedrich, J. M., & Rochette, P. (2015). Impact-related non coaxial deformation in the Pułtusk H chondrite inferred from petrofabric analysis. *Meteoritics and Planetary Science*, 50(3), 401–417.
- Rochette, P., Gattacceca, J., & Lewandowski, M. (2012). Magnetic classification of meteorites and application to the Soltmany fall. *Meteorites*, 2(1–2).
- Stöffler, D., Keil, K., & Edward R.D. S. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845–3867.
- Valenzuela, E. M. (2011). Procesos de Meteorización en Condritos Ordinarios del Desierto de Atacama, Norte de Chile: Nuevos Antecedentes sobre Meteorización de Material Extraterrestre en Ambientes Desérticos. Tesis de grado de Doctor en Ciencias mención Geología. (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 291 p.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5).
- Walton, Craig & Anand, Mahesh. (2017). Fault textures in meteorites: does rarity imply insignificance? 10.13140/RG.2.2.28993.66409.
- Wlotzka, F., 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics* 28 (3), Abstract, 460.

Clasificación de meteoritos del Desierto de Atacama utilizando susceptibilidad magnética, petrografía y técnicas espectroscópicas

María José Figueroa Zambrano¹⁻⁴, Matías Peña¹, Daniel Moncada², Samanta Aravena²⁻⁴, Grace Batalla³

(1) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Avenida Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Diego Portales, Instituto de Estudios Astrofísicos, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Avenida Ejército Libertador 441, Santiago, Chile

(4) Grupo de Meteoritos y Ciencias Planetarias, Sociedad Geológica de Chile, Santiago, Chile

En los últimos 50 años de nuestra historia, los estudios en meteoritos han tomado gran importancia al ser reconocidos como las rocas más antiguas del sistema solar. Un avance en el conocimiento de las zonas de alta densidad de meteoritos ha permitido el aumento de la cantidad de material extraterrestre y de investigaciones científicas desarrollándose en esta área. Esto propone el desafío de encontrar las maneras de preservar el material de estudio y de encontrar técnicas de clasificación no destructivas.

Actualmente los análisis geoquímicos involucran la destrucción parcial de una muestra de roca que, sumado a una descripción petrográfica detallada, permite la oficialización de un meteorito. Esto es perjudicial para el resguardo del material considerado geopatrimonio y refuerza la necesidad de un método rápido y no destructivo para caracterizar las muestras [1]. Siguiendo esta problemática, en este trabajo se busca realizar una comparación entre los métodos de clasificación comunes que incluyen petrografía frente a métodos no destructivos como susceptibilidad magnética y espectroscopia Raman, sumado a análisis de espectroscopia infrarroja con el objetivo de comprobar si un conjunto de métodos no destructivos puede eventualmente reemplazar a una clasificación oficial.

Se analizaron siete muestras correspondientes a fragmentos de Condritos Ordinarios recuperados en una campaña de terreno realizada el año 2019 por la Universidad de Chile y la Universidad Diego Portales en el Desierto de Atacama, específicamente en las zonas de Catalina y El Médano, ubicadas en el interior de la localidad de Taltal. Estos fragmentos fueron estudiados mediante cortes de doble pulido, donde se reconoció su mineralogía principal junto con sus parámetros característicos de tipo petrológico, estado de choque, grupo químico y grado de meteorización.

La metodología implicó realizar mediciones de susceptibilidad magnética para establecer la relación entre la magnetización inducida del material y la intensidad del campo magnético aplicado. Según [1] existe una correlación entre las propiedades magnéticas en condritos ordinarios y sus clases principales (H, L y LL), las que se definen por el contenido de hierro metálico y su grado de alteración. También se obtuvieron espectros Raman en cristales de olivino y piroxeno para analizar los peaks característicos de los minerales presentes, con los cuales se estimaron composiciones químicas en olivinos y piroxenos a través la metodología propuesta por [2]. Finalmente, se obtuvieron espectros infrarrojos de polvos de las muestras para confirmar la mineralogía descrita por petrografía e intentar correlacionar la estructura de los espectros con la mineralogía presente [3, 4].

Los resultados con susceptibilidad magnética y espectroscopia Raman son consistentes con la petrografía realizada en cuatro de las siete muestras; para las muestras no consistentes se propone que puede deberse a la saturación del instrumento al momento de la medición de susceptibilidad magnética y al efecto de una meteorización avanzada, lo que afectaría la respuesta de los metales frente al campo magnético inducido. Aun así, existe una relación entre lo obtenido con técnicas destructivas y no destructivas.

En este trabajo se concluye que los métodos no destructivos son efectivos, aunque tienen limitantes, pues requieren aun de algún otro método certero para complementar información precisa de la composición química. La combinación de técnicas es un aporte para la búsqueda de nuevas metodologías de clasificación, necesarias para la creación de nuevos repositorios en Chile y en el mundo.

Palabras Clave: Condritos Ordinarios, Técnicas no destructivas, Mineralogía.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del Proyecto FONDECYT N° 11170210 (DM) y el equipamiento del Proyecto FONDEQUIP EQM170103.

Referencias:

- [1] Rochette, P., L. Sagnotti, M. Bourot-Denise, G. Consolmagno, L. Folco, J. Gattacceca, M. L. Osete and L. Personen (2003). Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science* 38(2): 251-268 DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00263.x>.
- [2] Pittarello, L., Baert, K., Debaille, V., and Claeys, P. (2015). Screening and classification of ordinary chondrites by Raman spectroscopy. *Meteoritics and Planetary Science*, 50(10), 1718-1732. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.12506>.
- [3] Koike, C., Chihara, H., Tsuchiyama, A., Suto, H., Sogawa, H., and Okuda, H. (2003). Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicate. *Astronomy and Astrophysics*, 399(3), 1101-1107. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021831>.
- [4] Chihara, H., Koike, C., Tsuchiyama, A., Tachibana, S., and Sakamoto, D. (2002). Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicates. *Astronomy and Astrophysics*, 391(1), 267-273. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020791>.

Clues for the ages of the Serenitatis and Crisium basin impact events from anorthositic norites sampled at the Apollo 16 and 17 landing sites

Thomas Haber¹, Wajiha Iqbal², Tiantian Liu³, Carolyn H. van der Bogert², Harald Hiesinger², Ana Černok⁴⁻⁵, Harry Becker⁴, Erik E. Scherer¹

(1) Universität Münster, Institut für Mineralogie, Münster, Germany

(2) Universität Münster, Institut für Planetologie, Münster, Germany

(3) Museum für Naturkunde, Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity Science, Berlin, Germany

(4) Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften, Berlin, Germany

(5) University of Trieste, Italy

Introduction

Basin impacts on the Moon, especially those older than 4.0 Ga, offer valuable insights into the early bombardment history of the inner solar system. Two samples from the Apollo 16 and 17 landing sites, 67955 and 77017 respectively, contain anorthositic norites that are believed to have been generated by such events. Portions of 67955 possibly formed as a cumulate from a KREEP-rich impact melt sheet [1], which has been dated at 4.21 Ga [1,2,3]. Later brecciation and reheating partially or completely reset the U-Pb systems in zirconolite and phosphates [2,3,4]. Sample 77017 is believed to record the metamorphic recrystallization of a pre-existing anorthositic norite breccia at 1000–1100°C in an impact ejecta blanket before 4.0 Ga [5]. Using new multi-chronometer (¹⁷⁶Lu–¹⁷⁶Hf, ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd, ⁸⁷Rb–⁸⁷Sr, and Pb–Pb) data on 67955 and 77017, geological mapping, and the impact melt redistribution model of [6] we argue that the two samples represent the Serenitatis and Crisium basin impact events at 4.21 Ga and 4.15, respectively.

Method

The chronometer work was done using ~2 g of each sample (allocated to us by CAPTEM). Mineral separations in ethanol (required by the fine-grained nature of the sample), stepwise digestion, chemical separation, and isotopic analyses of the ¹⁷⁶Lu–¹⁷⁶Hf, ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd, ⁸⁷Rb–⁸⁷Sr, and Pb isotope systems were adopted and extended from [7, 8, 9, 10].

Results

We obtained Pb–Pb isochrons of 4203 ± 39 Ma (MSWD = 0.01; n = 3 of 7) for 67955 [11] and 4143 ± 9 Ma (MSWD = 0.99, Fig. 1) for 77017 [12]. Dating via ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd isochrons yielded dates of 4201 ± 45 Ma (MSWD = 1.2; n = 6 of 6) for 67955 and 4159 ± 16 Ma (MSWD = 1.3; n = 6 of 9) for 77017. The Sm–Nd data were corrected for neutron capture effects [13,14]. We also obtained a ~1.9 Ga ⁸⁷Rb–⁸⁷Sr isochron (MSWD = 1.7, n = 6 of 9) for 77017.

Discussion

Our ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd and ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb dates for 67955 confirm the ~4.21 Ga age of this sample [1,2,3]. Impact melt rocks predating the Imbrium event at the Apollo 16 landing site were most likely produced by Serenitatis or Nectaris [e.g.,6]. On the basis of trace element abundances in plagioclase and pyroxene of 67955, it has been shown that the sample may have crystallized from a parental melt enriched in KREEP elements [1], making it likely that the sample formed as a result of a basin impact into the Procellarum KREEP Terrane (PKT). Our Pb–Pb isotopic data can be used to test and do confirm such a scenario, indicating a Serenitatis origin for sample 67955. Rerunning the basin melt distribution model of [6] while recording the melt deposition after each basin forming event, we can show that Serenitatis melt products also arrived at the Apollo 16 landing sites in large quantities as a component of the Imbrium ejecta. This could explain how 67955 could have crystallized as a cumulate from a large Serenitatis melt in the PKT and then later be brecciated, partially reset [2,3,4], and deposited at the Apollo 16 landing site as a clast.

Our ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb and ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd dates for 77017 give a weighted average of 4147 ± 8 Ma (MSWD = 3.0), which we interpret as the >4.0 Ga recrystallization within a basin ejecta blanket that was proposed by [5]. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar data [15] point to a heating event and are consistent with our ~1.9 Ga ⁸⁷Rb–⁸⁷Sr isochron. This younger event likely represents the brecciation and heating of the sample and addition of the mare-like glass component [e.g.,16]. Using the age information, the particular composition of 77017, and the Pb isotopic composition of the samples, in combination with the identification of possible source craters from which the sample might have been launched to the Apollo 17 landing site [more details in ref. 17], and numerical modeling results of basin impact melt distributions on the lunar surface [6,18], we find the Crisium basin impact to be the most likely event dated by our 4147 ± 8 Ma sample age. Nectaris or Smythii are less likely candidate basins.

Taken together, the published dates for 67955 of [1,2,3] and our new dates for samples 67955 and 77017 suggest a difference of ~60 My between the recorded basin impacts, namely Serenitatis at 4.21 Ga and Crisium (or less likely, Nectaris or Smythii) at 4.15 Ga. This scenario is plausible in terms of Crisium being the stratigraphically younger basin than Serenitatis [e.g.,19]. A 4.21 Ga of Serenitatis (consistent with the suggestion of [20]) would be inconsistent with a terminal lunar cataclysm [e.g.,21] in which all basins stratigraphically between—and including—Imbrium and Serenitatis formed at ~3.9 Ga. Our results highlight the necessity of studying pre-4 Ga impact-generated rocks in order to understand the impact flux during the late heavy bombardment that was recorded by the lunar surface.

Keywords: Lunar chronology, Basin impacts, Isotopic dating, Moon.

References:

- [1] Norman M. D. et al. (2016) GCA, 172, 410-429.
- [2] Norman M. D. and Nemchin A. A. (2014) EPSL, 388, 387-398.
- [3] Vanderliek D. et al. (2021) Goldschmidt 2021, #6167.
- [4] Vanderliek D. et al. (2021) EPSL, 576, 117216.
- [5] Hudgins J. A. et al., GCA, 72, 5781-5798.
- [6] Liu T. et al. (2020) Icarus, 339, 113609.
- [7] Lumpkin G. R. and Zaikowski A. (1980) Am Min, 65, 390-392.
- [8] Todd E. et al. (2015) G-Cubed., 16, 2276-2302.
- [9] Borg L. E. et al. (2011) Nature, 447, 70-73.
- [10] Bast R. et al. (2015) JAAS, 30, 2323-2333.
- [11] Haber et al. (2023) Goldschmidt 2023, #19685.
- [12] Haber et al. (2022) 85th MetSoc, #6165.
- [13] Sprung P. et al. (2010) EPSL, 295, 1-11.
- [14] Sprung P. et al. (2013) EPSL, 380, 77-87.
- [15] Kirsten T. and Horn P. (1974) LSC V Proc., 2, 1451-1475.
- [16] Butler, P. (1973) Lunar Sample Information Catalog, Apollo 17.
- [17] Iqbal W. et al. (2022) LPSC LIII, #1045.
- [18] Liu et al. (2019) Icarus, 321, 691-704.
- [19] Orgel C. et al. (2018) JGR: Planets, 123, 748-762.
- [20] Černok A. et al. (2021) Nature Commun. Earth Environ., 2, 120.
- [21] Tera F. et al. (1974) EPSL, 22.

Análisis petrológico y mineralógico sobre dos condritas halladas en el Desierto de Atacama, para la clasificación e interpretación de sus orígenes

Francisca Salazar Dinamarca¹⁻⁴, Millarca Valenzuela Picón², Francisco Hervé Allamand¹⁻³

(1) Universidad Andrés Bello, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, República 252, Santiago, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Universidad de Chile, Geología, Santiago, Chile

(4) Universidad Mayor, Geología, Santiago, Chile

Introducción

La mayoría de los meteoritos que han caído a la Tierra (~86%) corresponden a condritas, y estas representan rocas primitivas compuestas por la acreción de diversos materiales que se encontraban en diferentes regiones dentro de la Nebulosa Solar. He ahí su relevancia al momento de comprender los procesos iniciales en la formación del sistema solar, planetaria y cuerpos menores.

En Chile, el Desierto de Atacama representa una de las superficies con mayor densidad de meteoritos por kilómetro cuadrado (~100 met/km²) debido a su antigüedad y su estado de hiperaridez que se ha mantenido durante millones de años (2). Por esta razón, la clasificación de meteoritos es especialmente relevante en el país y para ello se han investigado diversas técnicas no destructivas para interpretar sus orígenes y clasificación. En este contexto, se han realizado análisis petrológicos y mineralógicos en dos muestras de condritas ordinarias halladas en el Desierto de Atacama, con el objetivo de clasificarlas e interpretar sus orígenes.

Metodología

Las muestras AV-M04-B y AV-M07-B son meteoritos no clasificados previamente, donados por el coleccionista Alonso Viera. Fueron recolectados en 2021 cerca de la ciudad de Calama, Región de Antofagasta, Chile. Para analizar estas muestras, se utilizaron equipos como el microscopio petrográfico, el microscopio electrónico de barrido (SEM), el susceptibilímetro ATACAMET y el microscopio automatizado QEMSCAN® (Evaluación Cuantitativa de Minerales por Microscopía Electrónica de Barrido). Estas técnicas permitieron obtener descripciones petrográficas mediante microscopía óptica de los componentes condriticos, texturas y estructuras, así como imágenes detalladas en BSE, análisis puntual semicuantitativo (DRX), abundancias y aportes elementales, abundancias minerales y mapas mineralógicos en falso color.

Resultados

Preliminarmente, ambos meteoritos se clasificaron como condritas ordinarias. La muestra AV-M04-B se clasificó como H6/S4/W2, mientras que AV-M07-B se clasificó como H4/S3/W2 (3). Para esto se basó en la descripción petrológica óptica y los análisis de susceptibilidad magnética. Las técnicas de microscopía electrónica (SEM Y QEMSCAN®) se utilizaron de manera complementaria.

Discusión y conclusiones

La metodología proporcionada por QEMSCAN® resultó ser un complemento al estudio petrográfico, ya que permitió analizar las texturas encontradas en cóndrulos y determinar la abundancia de los componentes minerales necesarios para establecer la clase y el tipo petrológico. Sin embargo, para otros criterios como el grupo químico se utilizó la susceptibilidad magnética y el grado de meteorización en conjunto con los análisis químicos de QEMSCAN®, lo que resultó en resultados variables entre ambas técnicas, clasificando las muestras como H y L respectivamente.

Esta última metodología presenta algunas limitaciones en la clasificación de condritas es la baja resolución (5 µm) del mapa mineralógico que dificulta el reconocimiento de estructuras asociadas al metamorfismo de choque. Por otro lado, la sobreestimación errónea de minerales metálicos de Fe-Ni en vez de la mineralogía secundaria de óxidos de hierro, lo cual no permite observar adecuadamente el avance de la meteorización al visualizar los mapas mineralógicos y consecuentemente genera una sobreestimación de hierro en estado de oxidación 0 (Fe⁰).

Finalmente, en base a estas contribuciones y limitaciones, se sugiere la implementación de técnicas más precisas de clasificación de meteoritos para confirmar la precisión de los resultados entregados por QEMSCAN® y desarrollar la lista SIP en la determinación de minerales de alteración. Por lo tanto, aunque esta metodología puede utilizarse como un punto de partida en la clasificación de condritas ordinarias, pero aun es necesario realizar modificaciones en función de las contribuciones realizadas por otros investigadores. Además, resultó ser una herramienta interesante para el estudio de las texturas desarrolladas en los cóndrulos y su relevancia en la comprensión de los procesos iniciales de la formación del Sistema Solar.

Palabras Clave: Clasificación de meteoritos, Condritas ordinarias, Desierto de Atacama, QEMSCAN®, Petrología de cond.

Agradecimientos: Agradezco al Sr. Viera y la Dra. Valenzuela por esta oportunidad, a GEOMAQ Ltda. y al Dr. Acosta por el uso de QEMSCAN, al grupo de Petrología y la Dra. Oyarzún de la UNAB, y la UCN por su apoyo.

Referencias:

- (1) McSween, J. H., & Huss, G. (2010). Meteorites: A record of nebular and planetary processes. En J. H. McSween, & G. Huss, Cosmochemistry (págs. 157-191). Cambridge: Cambridge University Press.
- (2) Valenzuela, M., Baeza, L., & Vanzi, L. (2015). Meteoritos chilenos: resultados obtenidos después de 10 años de búsqueda en el Desierto de Atacama. XIV Congreso Geológico Chileno, (págs. 404-407). La Serena.
- (3) Salazar, F. (2023). Análisis petrológico y mineralógico sobre dos condritas halladas en el Desierto de Atacama, para la clasificación e interpretación de sus orígenes. Memoria de Título de Geóloga, Universidad Andrés Bello, Departamento Ciencias de la Tierra.

Estimación del peak metamórfico de condritos carbonáceos alterados térmicamente a través de perfiles de difusión de Fe-Mg

Kevin Soto¹⁻², Millarca Valenzuela Picon¹⁻², Camila Caviedes Cameron²⁻³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines CATA, Camino El Observatorio 1515, Santiago, Chile

(3) Universidad de Atacama, Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

Durante los últimos años, una cantidad importante de reconstrucción del clima terrestre Neógeno del desierto de Atacama. U-Pb silcretes y tanto de condritos carbonáceos han sido encontrados en el desierto de Atacama (46 según Meteoritical Bulletin Database, <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>). Los condritos carbonáceos de mayor abundancia encontrados en Chile corresponden a los del grupo CK y CO, que son reconocidos por haber sido alterados térmicamente durante la etapa post-acreción del asteroide del cual provienen, al igual que los condritos ordinarios que son los meteoritos más comunes encontrados en nuestro planeta. Esta alteración afectó la composición química original, la cual tuvo distintas intensidades en los mismos cuerpos parentales y generó diferentes tipos petrológicos, clasificados desde tipo petrológico 3 para muestras menos alteradas, hasta tipo petrológico 6 para muestras muy alteradas (Van Schmus y Wood, 1967). El peak metamórfico alcanzado por los diferentes tipos petrológicos ha sido objeto de extensa discusión científica, debido a que se desea obtener mejores restricciones de temperatura que permitan generar modelos de evolución térmica en los diferentes cuerpos parentales de los distintos tipos de condritos. Sin embargo, la clase de condritos carbonáceos y sus grupos alterados térmicamente (CK, CO y CV) no han sido extensamente estudiados como lo han sido los condritos ordinarios.

Por lo anterior, es que en este trabajo se pretende evaluar la historia térmica del cuerpo parental de condritos carbonáceos alterados térmicamente encontrados en el desierto de Atacama, estimando la temperatura que alcanzaron los meteoritos en la etapa post-acreción durante el Sistema Solar temprano. Para ello, se caracterizará petrológicamente los condritos carbonáceos CK3 (Calama 199) y CO3 (Los Vientos 123, El Médano 256, El Médano 481) realizando un completo análisis de la abundancia modal de sus componentes a través de imágenes mosaico de electrones retrodispersados (BSE) en microscopía electrónica de barrido (SEM), y una clasificación según su estado de choque (S) (Stöffler et al., 1991, 2018) y grado de meteorización (W) (Wlotzka, 1993; Rubin y Huber, 2005) utilizando luz reflejada y transmitida en microscopía óptica. Además, se estimará el peak metamórfico de estas muestras a través del uso de un coeficiente de difusión integrado en el tiempo, que mezcla un modelo de difusión de Fe-Mg en granos de olivino con un modelo térmico de cuerpos parentales (Schwinger et al., 2016). Para llevar a cabo lo anterior, se identificarán granos de olivino con zonaciones químicas a través de imágenes BSE-SEM, y posteriormente estos granos serán analizados utilizando un detector de electrones retrodispersados (EBSD) en SEM para ajustar los perfiles de difusión de Fe-Mg según la orientación cristalográfica de los cristales de olivino. El análisis geoquímico de los perfiles en los cristales de interés será realizado con microsonda electrónica (EPMA), cuyo análisis también será útil para realizar una clasificación por subtipo petrológico según la desviación media porcentual (PMD) del olivino (Sears et al., 1980).

Este trabajo corresponde a los primeros resultados de una investigación que desea profundizar el comportamiento térmico de los cuerpos parentales de los condritos carbonáceos del grupo CK y CO, añadiendo una componente biológica relacionada a la medición de abundancia de la materia orgánica soluble (SOM) en los diferentes sub-tipos petrológicos y como ésta pudo haberse transformado o destruido con la alteración térmica que sufrieron las muestras en sus cuerpos parentales.

Palabras Clave: Condritos carbonáceos, Peak metamórfico, Petrología.

Financiamiento: Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA).

Agradecimientos: Beca Doctorado Nacional ANID 2122026 y Unidad de Equipamiento Científico MAINI de la Universidad Católica del Norte (UCN).

Referencias:

- Rubin, A. E., & Huber, H. (2005). *Meteoritics & Planetary Science*, 40(8), 1123-1130.
- Schwinger, S., Dohmen, R., & Schertl, H. P. (2016). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 191, 255-276.
- Sears, D. W., Grossman, J. N., Melcher, C. L., Ross, L. M., & Mills, A. A. (1980). *Nature*, 287, 791-795.
- Stöffler, D., & Keil, K. (1991). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845-3867.
- Stöffler, D., et al. (2018). *Meteoritics & Planetary Science*, 53(1), 5-49.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.
- Wlotzka, F., 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics* 28 (3), Abstract, 460.

Caracterización petrológica y origen de dos condritos ordinarios encontrados en el Desierto de Atacama, Chile

Kevin Soto¹⁻², Alexandre Corgne³, Millarca Valenzuela Picon¹⁻², Gabriel Pinto⁴

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines CATA, Camino El Observatorio 1515, Santiago, Chile

(3) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Av. Eduardo Morales Miranda, Valdivia, Chile

(4) Universidad de Atacama, Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

El desierto de Atacama ha sido reconocido como un sitio favorable para la exploración y estudio de meteoritos, debido a la ausencia de vegetación que facilita su hallazgo, y a su característico clima hiperárido que permite la conservación y acumulación de estos materiales en el tiempo (Gattacceca et al., 2011; Hutzler et al., 2016). El objetivo de este trabajo es entregar una clasificación y descripción petrológica de dos muestras de meteoritos encontrados en el desierto de Atacama, que se representan por las muestras DM055-A1 y JG174. Además, se desea profundizar sobre los procesos que ocurrieron en el cuerpo parental de estas muestras y como las condiciones ambientales afectaron la composición original de estos meteoritos cuando alcanzaron la superficie terrestre.

Las muestras fueron clasificadas según su clase, tipo petrológico (Van Schmus y Wood, 1967), grupo químico (Grossman y Rubin, 2002), estado de choque (S) (Stöffler et al., 1991, 2018; Bennett y McSween, 1996) y grado de meteorización (W) (Wlotzka, 1993) a través del estudio de secciones delgadas pulidas en microscopio óptico a luz transmitida y reflejada, como también con análisis semicuantitativos en un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) acoplado a un microscopio electrónico de barrido (SEM). Ambas muestras exhibieron una textura condritica, con cóndrulos mayoritariamente del tipo porfírico tales como POP, PO y GOP (~80 vol%), siendo el ~20 vol% restante cóndrulos no-porfíricos como BO y RP. Los minerales opacos corresponden a kamacita, taenita, tetrataenita, troilita, oxihidróxidos de Fe-Ni y fases minerales menores tales como cromita. Se registró una menor abundancia de cóndrulos en DM055-A1 (~17±5 vol%) que en JG174 (~29±5 vol%), debido a que en DM055-A1 se observa una gran cantidad de relictos y fragmentos en la matriz, con cóndrulos mayoritariamente deformados y recrystalizados. En ambos condritos, la matriz se compone principalmente de olivino, piroxeno y feldespato intersticial. Ambas muestras exhiben un re-equilibrio químico, evidenciado por los contenidos homogéneos de fayalita (Fa) y ferrosilita (Fs) en los granos de olivino y piroxeno respectivamente. Estas composiciones EDS se compararon entre granos de la matriz y cóndrulos en cada muestra, resultando ser $Fa_{19 \pm 2}$ y $Fs_{16 \pm 8}$ (N=84) para DM055-A1, y $Fa_{18 \pm 2}$ y Fs_{16} (N=72) para JG174. Por estos valores de Fa y Fs, más la abundancia modal de los diferentes tipos de cóndrulos, ambas muestras son clasificadas como condritos ordinarios H. La sub-esfericidad de los cóndrulos son consistente con un tipo petrológico 5 y 4 para DM055-A1 y JG174 respectivamente. Por otro lado, las evidencias del estado de choque en silicatos y minerales opacos son similares en ambas muestras, clasificándose con un S3 principalmente por deformaciones planares e irregulares en silicatos, y presencia de troilita policristalina. El grado de meteorización es evidenciado por el porcentaje de reemplazo de metales Fe-Ni y troilita, siendo menor al 5 vol% en JG174 (W4) y mayor al 80% en DM055-A1 (W4). Además se detectaron cantidades mínimas de Cl en los productos de meteorización de ambas muestras, la que se relaciona a la presencia del mineral akagaenita por el reemplazo de las fases metálicas originales.

Con los resultados obtenidos, es posible explicar la historia del cuerpo parental de los condritos ordinarios estudiados. Debido a que ambos son del mismo grupo químico H, ambos condritos ordinarios provienen del mismo cuerpo parental, posiblemente un asteroide del tipo espectral S ubicado en el Cinturón de Asteroides (Vernazza et al., 2014; Noonan et al., 2019). Sin embargo, posterior a la acreción, las muestras sufrieron diferentes alteraciones térmicas. La muestra DM055-A1 fue la más afectada, alcanzando una temperatura metamórfica mayor que JG174. Posiblemente, esto se deba a que la muestra DM055-A1 proviene de un sitio más profundo del cuerpo parental donde el metamorfismo térmico fue más intenso, según el modelo térmico 'onion-shell' (Trieloff et al., 2003; Ghosh et al., 2006; Henke et al., 2013). Posteriormente, o durante el metamorfismo térmico, el cuerpo parental sufrió uno o más eventos de choque con otros cuerpos durante el caótico inicio del Sistema Solar, que llevó a impactos de presiones entre los 15 y 20 GPa, generando un aumento de temperatura entre los 100 y 150° C. Finalmente, las muestras fueron separadas de su cuerpo parental, viajaron a través del espacio por un tiempo indeterminado y cayeron posiblemente en tiempos diferentes en la superficie terrestre, sufriendo sus posteriores eventos de meteorización.

Palabras Clave: Desierto de Atacama, Condritos ordinarios, Petrología.

Financiamiento: Proyecto DID S-2017-13 de la Universidad Austral de Chile (UACH) y proyecto Fondecyt 11171090.

Agradecimientos: Beca Doctorado Nacional ANID 21222026.

Referencias:

- Bennet, M. E., & McSween Jr, H. Y. (1996). *Meteoritics & Planetary Science*, 31(6), 783-792.
- Gattacceca, J., et al. (2011). *Meteoritics & Planetary Science*, 46(9), 1276-1287.
- Ghosh, A., et al. (2006). *Meteorites and the early solar system II*, 555-566.
- Grossman, J., & Rubin, A. E. 2002. *Meteorological Research* 106 (11), 1323-1330.
- Henke, S., et al. (2013). *Icarus*, 226(1), 212-228.
- Hutzler, A., et al. (2016, August). Abstract for the 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society August (pp. 07-12).
- Noonan, et al. (2019). *The Astronomical Journal*, 158(5), 213.
- Stöffler, D., & Keil, K. (1991). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845-3867.
- Stöffler, D., et al. (2018). *Meteoritics & Planetary Science*, 53(1), 5-49.
- Trieloff, M., et al. (2003). *Nature*, 422(6931), 502-506.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.
- Vernazza, P., et al. (2014). *The Astrophysical Journal*, 791(2), 120.
- Wlotzka, F. (1993). *Meteoritics*, 28.

Desarrollo de calibración Fa-Fo en Olivino mediante espectrometría Raman: Clasificación de condritos ordinarios

Francisca Tapia Ayala¹, Daniel Moncada¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Los condritos están considerados como uno de los tipos de meteoritos más primitivos, puesto que no han experimentado procesos de diferenciación química desde su formación, hace aproximadamente 4.6 billones de años, por lo que su composición es semejante a la de la nebulosa solar primitiva (Yomogida & Matsui, 1983). Es debido a esto que este tipo de meteoritos corresponden a una de las fuentes más importantes de información sobre procesos que ocurrieron durante las etapas más tempranas de la evolución del sistema solar (Hutchinson, 2004). En este sentido, su clasificación es importante debido a que se definen propiedades mineralógicas y petrológicas fundamentales que permiten estudiar estos procesos con mayor detalle y, además, permite ordenar meteoritos en grupos de características similares que facilita una mejor comprensión del origen de este tipo de rocas y la relación con su entorno.

Los condritos comprenden la mayor parte de los meteoritos caídos a la Tierra (~80%), y de estos, más del 90% corresponden a condritos ordinarios (Weisberg et al., 2006). Al no haber sufrido cambios que resultaran en diferenciación, los condritos ordinarios corresponden a las muestras menos alteradas de aglomerados nebulares. Además, de los distintos grupos de condritos, estos presentan un rango variado y amplio de texturas y composiciones. Los condritos se definen por ser rocas que presentan una textura característica en general, la cual corresponde –de forma simplificada– a una matriz de grano fino con agregados minerales de tamaños milimétricos, llamados cóndrulos. Estos últimos son objetos de material silicatado que han experimentado procesos de fusión antes de ser incorporados a un cuerpo parental condritico, por lo que corresponden a elementos que fueron fusionados antes o durante el periodo de acreción que resultó en la formación de condritos (Hutchinson, 2004). Estos agregados generalmente presentan formas esféricas, pero también pueden presentarse como fragmentos, pueden estar moldeados alrededor de otros cóndrulos o simplemente no haber sido fusionados completamente y, por lo tanto, no presentar formas redondeadas. Estos están compuestos principalmente por los minerales ferromagnesianos olivino $[(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4]$ y piroxeno $[(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_6]$, con este último presente típicamente como granos de piroxeno bajo en Ca (Russell et al., 2018).

Los olivinos cristalizan en el sistema ortorrómbico, con una estructura cristalina que consiste en tetraedros aislados de silicio unidos lateralmente a cationes divalentes. Se distinguen por sus propiedades como relieve alto, forma euhedral a subhedral (generalmente como polígonos), comúnmente presentan fracturas irregulares, extinción paralela y signo óptico que depende de su composición, es decir, para olivinos de composiciones $\text{Fa}_0 - \text{Fa}_{15}$ su signo óptico corresponde a biaxial positivo, y para olivinos de composición $\text{Fa}_{15} - \text{Fa}_{100}$, biaxial negativo. Generalmente, este mineral ocurre como masas granulares o compactas, y raras veces como cristales desarrollados distintivamente. Además, los fenocristales se caracterizan por presentar secciones transversales de seis a ocho lados (Nesse, 1986).

La clasificación de condritos ordinarios depende de la cantidad de hierro presente en la muestra (Van Schmus & Wood, 1967). Así, es posible agrupar estos objetos en tres grupos químicos distintos:

- Grupo H (*High Iron*), que representa a aquellos condritos con el mayor contenido de hierro, con razones Fe/SiO_2 y FeO/Fe más altas, y bajo nivel de oxidación. Estos condritos pueden ser reconocidos por su contenido de fayalita en olivinos, en el rango 16-20% mol., y su contenido de ferrosilita en piroxenos, en el rango 15-17% mol.
- Grupo L (*Low Iron*), que corresponde al grupo con cantidades de hierro total bajas y, por lo tanto, razones Fe/SiO_2 y FeO/Fe menores. Asimismo, este grupo presenta un grado de oxidación mayor comparado con el grupo H. Este también se caracteriza por cantidades de fayalita en el rango 21-26% mol., y cantidades de ferrosilita en el rango 18-22% mol.
- Grupo LL (*Very Low Iron*), el cual representa los condritos ordinarios con la cantidad de Fe total más baja y, en consecuencia, la menor razón atómica Fe/Si . Es por esto que este corresponde al grupo con mayor nivel de oxidación dentro de los condritos ordinarios. Este grupo presenta cantidades de fayalita en el rango 27-31% mol., y de ferrosilita en el rango 22-30% mol.

Estas composiciones pueden ser obtenidas a través de análisis de microsonda electrónica (EPMA), técnica utilizada para análisis químico en la cual se bombardea un área pequeña de una muestra sólida con un haz fino de electrones, emitiendo rayos-X característicos de los elementos presentes, de los cuales se mide su longitud de onda e intensidad (Reed, 2005). Por otro lado, estas composiciones también pueden obtenerse mediante espectrometría Raman, la cual es una técnica no destructiva de análisis químico que entrega información detallada sobre la estructura química y cristalina de un material, basada en la interacción de la luz con los enlaces químicos de estos, es decir, el fenómeno de dispersión de luz inelástica, conocido como *efecto Raman*. Esta técnica se basa en la iluminación de un material con luz monocromática en el rango de espectro visible, seguida por la interacción de fotones incidentes con las vibraciones moleculares o fonones cristalinos, que inducen un pequeño cambio en la longitud de onda de los fotones dispersados (Neuville et al., 2014). Este cambio de longitud de onda depende de la estructura química de las moléculas responsables de la dispersión, por lo que el espectro Raman representa una "huella digital" del compuesto estudiado. Algunas ventajas de la espectrometría Raman son la poca preparación que necesitan las muestras, ya que, por ejemplo, no se necesita recubrir las con una capa de carbono, pulirlas o separar minerales; la calibración del instrumento se limita a una verificación con una lámina de silicio, por lo que no depende del tipo de muestra analizada y no se requieren materiales de referencia específicos; y no se requiere un alto vacío, reduciendo los problemas que pueden ser causados por la presencia de muestras húmedas.

Con respecto a trabajos anteriores, Wang et al. (2001) caracteriza estructural y composicionalmente distintos tipos de piroxenos provenientes de rocas terrestres y meteoritos utilizando espectrometría Raman, logrando diferenciarlos de acuerdo a la cantidad en porcentaje molar de sus miembros extremos (Mg, Fe y Ca), de acuerdo a una relación lineal para los tres peaks en el espectro representativo del piroxeno. Kuebler et al. (2006) realiza un trabajo similar para obtener la composición Fayalita-Forsterita, cubriendo el espectro de composiciones para olivinos.

A partir de estos estudios, Pittarello et al. (2015) utiliza espectrometría Raman para determinar el contenido de miembros extremos de olivino y piroxeno en condritos ordinarios, mediante una relación entre el cambio de longitud de onda de *peaks* característicos en el espectro y su razón Mg/Fe en estas fases. El contenido de Ferrosililita-Enstatita en piroxenos y Fayalita-Forsterita en olivinos fue estimado mediante un recálculo de las relaciones lineales propuestas por Wang et al. (2001) y Kuebler et al. (2006), respectivamente. Este estudio deduce una relación entre la posición de los *peaks* en el espectro Raman para olivino y piroxeno, y los distintos grupos químicos en los que se pueden clasificar los condritos ordinarios. Nascimento-Dias et al. (2021) utiliza la misma metodología para analizar un fragmento del meteorito de Allende que corresponde a un meteorito de tipo carbonáceo, expandiendo las posibilidades de clasificación de condritos a no solo condritos ordinarios, sino para las otras clases.

Se propone la espectrometría Raman como una técnica alternativa de clasificación de condritos ordinarios, mediante la determinación del contenido de miembros extremos de olivino en condritos ordinarios. Así, de acuerdo los rangos establecidos para fayalita en la clasificación de grupos químicos H, L y LL, se espera establecer una función entre el cambio de longitud de onda de *peaks* característicos en los espectros Raman y la razón Mg/Fe de las fases fayalita-forsterita.

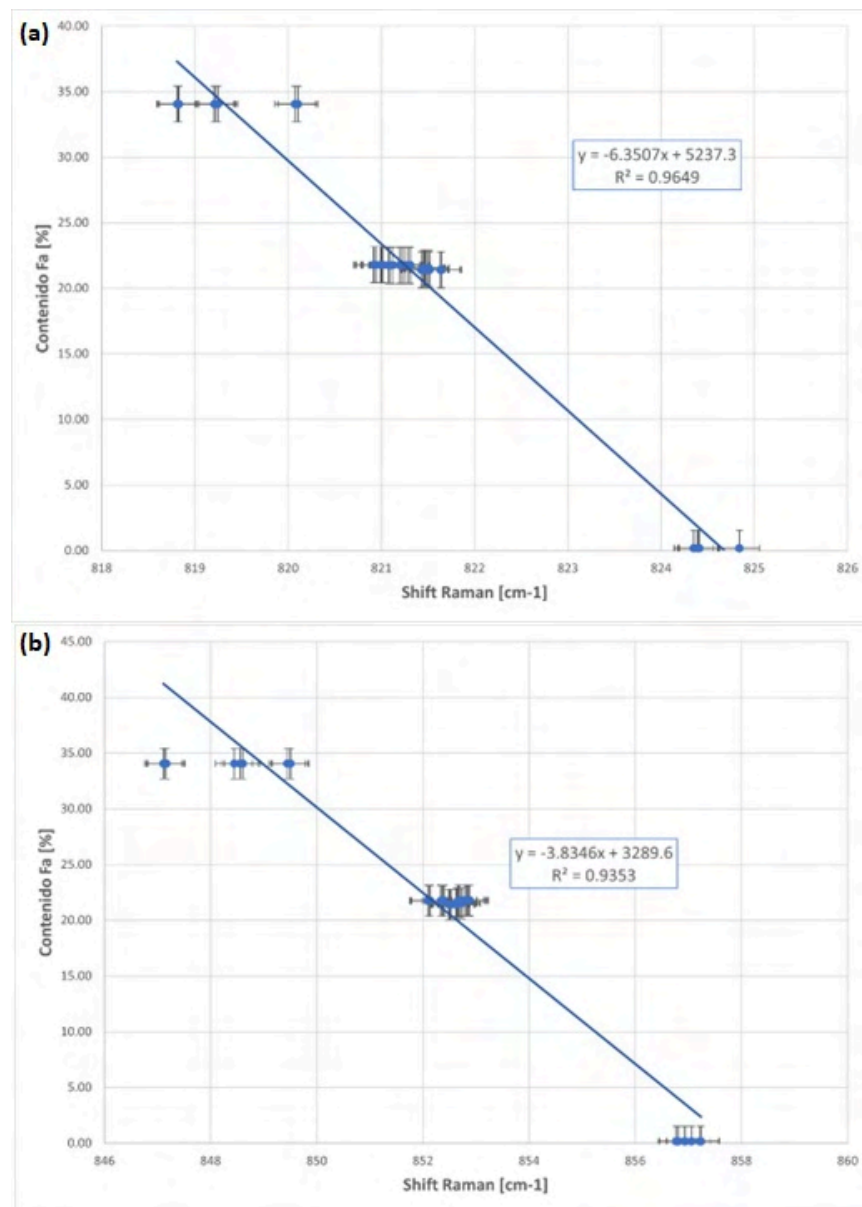


Figura 1. Correlación entre contenido de fayalita y shift Raman para muestras de composición conocida, y la relación lineal obtenida para peak A (a) y peak B (b), característicos de olivino.

Para esto, primero se realiza una toma de espectros en un rango entre 5 y 100 segundos para muestras de condritos de composición conocida, en cuatro puntos distintos de un mismo cóndrulo, con tal de obtener el tiempo de adquisición para la toma de muestras posterior, de acuerdo a la razón entre intensidades I1/I2 respectivas a los *peaks* característicos de cada mineral. Los *peaks* característicos de olivino se encontraron en los rangos 818-825 cm⁻¹ y 847-857 cm⁻¹, para peak A y B respectivamente. Se tomaron tres espectros por cada punto, con un espectrómetro LabRAM HR Evolution (HORIBA Scientific), equipado con un láser HeNe correspondiente a luz verde (532 nm), con un hole de 200 µm, grating de 1800 gr/mm, filtro de 10% (intensidad promedio de 3.3 mW) y un objetivo de 100X de larga distancia, en un rango entre 200 a 1300 cm⁻¹.

El olivino puede presentarse en diferentes formas de cristal dependiendo de las condiciones durante su formación, a través de la combinación de diferentes caras cristalinas. Los cristales de olivino son generalmente una combinación de tres prismas, tres pinacoides y una bipirámide, presentándose comúnmente aplastados de forma paralela según los pinacoides. De acuerdo a las distintas formas en las que puede presentarse este mineral, la orientación de los cristales en la superficie de una sección delgada puede ser aleatoria debido al corte realizado para obtener la muestra. Al momento de analizar los minerales mediante espectrometría Raman, la dirección en la que el láser incide a la superficie no depende de esta orientación. Por lo tanto, la toma de espectros en un rango variado de tiempos y el cálculo posterior de razón de intensidades con el fin de encontrar un tiempo de adquisición minimiza la variación de orientaciones que podrían estar presentes.

Posteriormente, y según el tiempo de adquisición resultante, se tomaron espectros de muestras de cóndrulos y granos minerales de composición conocida (obtenida previamente mediante análisis de microsonda electrónica), y se relacionaron los *peaks* obtenidos con su porcentaje de fayalita presente. Así, se obtienen relaciones lineales en función de la frecuencia o *Raman shift* por cm⁻¹ (Figura 1), para el peak A y peak B característicos del olivino. Finalmente, estas relaciones pueden utilizarse para el cálculo del porcentaje de fayalita en cóndrulos de meteoritos que no han sido clasificados, y comparar este resultado con los rangos mencionados anteriormente para agruparlos en su grupo químico respectivo.

Se espera compilar en una base de datos los resultados de longitud de onda y calcular -mediante un sistema informático asociado a esta- el contenido de fayalita relacionado. De acuerdo a los valores calculados, se clasificará automáticamente la muestra en el grupo químico correspondiente, en base a los rangos establecidos anteriormente.

Palabras Clave: Condritos ordinarios, Espectrometría Raman, Meteoritos, Ciencias Planetarias.

Agradecimientos: Al proyecto FONDEQUIP EQM170103, por el financiamiento para el laboratorio Lab-Ram de micro-Raman del departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Referencias:

- Do Nascimento-Dias, B. L., Donato, T. P., Zucolotto, M. E., & dos Anjos, V. (2021). Raman spectral peak positions of olivine (Fo-Fa) as fast methodology for classifying chondrites. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(6), 1206–1211.
- Hutchinson, R. (2004). *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press: 511 pp. New York.
- Kuebler, K., Jolliff, B., Wang, A., & Haskin, L. (2006). Extracting olivine (Fo-Fa) compositions from Raman spectral peak positions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 6201–6222.
- Nesse, W. (1991). *Introduction to Optical Mineralogy* (Segunda ed.). Oxford University Press.
- Neuville, D., Henderson, G., & de Ligny, D. (2014). Advances in Raman Spectroscopy Applied to Earth and Material Sciences. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 78, 509-541.
- Pittarello, L., Baert, K., Debaille, V., & Claeys, P. (2015). Screening and classification of ordinary chondrites by Raman spectroscopy. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(10), 1718-1732.
- Reed, S. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* (Segunda ed.). Cambridge University Press.
- Russell, S., Connolly Jr., H., & Krot, A. (2018). *Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge Planetary Science.
- Stöffler, D., Keil, K., & Scott, E. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Van Schmus, W., & Wood, J. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.
- Wang, A., Jolliff, B., Haskin, L., Kuebler, K., & Viskupic, K. (2001). Characterization and comparison of structural and compositional features of planetary quadrilateral pyroxenes by Raman spectroscopy. *American Mineralogist*, 86(7-8), 790–806.
- Yomogida, K., & Matsui, T. (1983). Physical properties of ordinary chondrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B11), 9513-9533.

Estadística actualizada de meteoritos chilenos: descubrimiento de tipos de meteoritos escasos y su importancia para comprender procesos primarios en el Sistema Solar y su evolución

Millarca Valenzuela Picon¹⁻³, Camila Caviedes Cameron²⁻³, Kevin Soto¹⁻³

(1) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias INCT, Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

(3) Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías Asociadas CATA, Camino El Observatorio 1515 - Las Condes, Santiago, Chile

El aumento del número de meteoritos, así como de la mayor diversidad de tipos encontrados en Chile en los últimos 5 años, refleja el efecto del aumento de las expediciones internacionales que llegan a Chile a buscar estas rocas extraterrestres, las que luego son llevadas al extranjero, al no existir aún una normativa que regule la búsqueda, recolección y exportación de este valioso material.

La cantidad actual de meteoritos chilenos presentes en la base de datos más importante de la comunidad científica muestra que el número de meteoritos del catálogo actual cuadruplica la cantidad registrada al 2018, ~2800 en 2023 comparado con el valor de ~650 del 2018. Este gran número está principalmente dominado por el tipo de meteorito más frecuente que cae a la Tierra, los condritos ordinarios, que pasaron de ser 577 en 2018, a 2665 en 2023. La información se encuentra disponible en el Meteoritical Bulletin [1], una plataforma on-line de acceso gratuito que da información relevante de cada meteorito encontrado y clasificado en el mundo.

Además del número, es interesante ver la cantidad de nuevas superficies de acumulación, principalmente concentradas en la región de Antofagasta, destacando Calama con 432 meteoritos encontrados en áreas cercanas a la ciudad del mismo nombre; Calate con 32; Catalina con casi 90 meteoritos sobre los 450 encontrados antes del 2019; Chug Chug con 171; 8 en Coya Sur; 32 en el El Médano, sobre los 490 encontrados anteriormente a 2019; Limón Verde con 36; 41 en Los Vientos, sobre los 486 previos a 2019; Machuca con 29; Paposo con 81; San Juan con 7, sobre 114 previos a 2019; Sierra Gorda con 138; Toconao con 6 y Vaquillas con 6.

El aumento de hallazgos ha permitido que dentro de la colección aparezcan más representantes de los tipos de meteoritos menos frecuentes de encontrar. Entre ellos, los que cuadruplicaron su número fueron representantes de los meteoritos conocidos como HED's, provenientes del asteroide 4 Vesta, tanto en el número de howarditas (4), eucritas (8) y diogenitas (4). Además se reportó el primer acondrito primitivo, correspondiente a una brachinita de más de 2 kilos, encontrada en el área de El Médano. Los condritos carbonáceos se triplicaron (47), aumentando los tipo CO (5), los CK (3) y los CV (2).

Tanto los nuevos condritos ordinarios encontrados, que incorporaron ~70 especímenes de tipo petrológico 3, los más primitivos, así como los nuevos condritos carbonáceos y acondritos, abren nuevas fuentes de material para la investigación de procesos tempranos como la condensación de los primeros sólidos en la nebulosa solar, la acreción que permitió la formación de los primeros planetesimales, la evolución posterior que permitió la formación de planetas, así como también investigar la presencia de moléculas orgánicas prebióticas en ciertos meteoritos, que permiten indagar en los procesos que dieron paso al surgimiento de la vida en nuestro planeta y quizás en otros cuerpos del Sistema Solar. Se presentarán algunos ejemplos de los meteoritos más interesantes de la lista actual, que permitirán seguir haciendo crecer la meteorítica en Chile.

Palabras Clave: Meteoritos chilenos, Superficies del Desierto de Atacama, Procesos primarios formación planetaria, Origen de la vida.

Financiamiento: Centro de Astrofísica y Tecnologías Asociadas CATA.

Referencias:

- [1] <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>

Naturaleza del evento anómalo ocurrido en la precordillera de la región de Antofagasta el 15 de enero 2022, inicialmente asociado a la caída de un meteorito o chatarra espacial

Millarca Valenzuela Picon¹, Marina Vargas³, Cecilia Demergasso², Carolina Muñoz³, Andrea Vásquez³, Claudia Álvarez³, Chyntia Tebes-Cayo², Javier Sáez¹, Antonio Zárate⁴

(1) Departamento de Ciencias Geológicas, FICG, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
(2) Laboratorio del Centro de Biotecnología, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
(3) Unidad de Equipamiento Científico MAINI, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
(4) Departamento de Física, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Introducción

El día 15/01/2022, se reportó una situación anómala en un área distal de la Compañía Minera Zaldívar (CMZ). La CMZ emitió un informe de seguridad, y delimitó un área alrededor de 2 cráteres pequeños, cercanos a la línea de electricidad. Se solicitó apoyo a diferentes entidades ante la alerta de la presencia de un material negro que humeaba. Representantes locales de ONEMI (SENAPRED actualmente), de la Seremi del Ministerio de Ciencias, Tecnología, Conocimiento e Innovación, del Ministerio de Salud, Bomberos y otros agentes de seguridad de CMZ, crearon una mesa de trabajo para estudiar el fenómeno, que en principio no descartó la caída de un meteorito o de chatarra espacial. A petición de investigadores UCN, se solicitó que la investigación fuera hecha por expertos locales en rocas, meteoritos, fenómenos físicos, y protocolos biológicos para discriminación de toxicidad biológica. Los investigadores accedieron al lugar el 6 de febrero, donde se levantó toda la información necesaria. Previamente el personal de CCHEN había descartado radioactividad en el sitio del evento.

Metodología

Se realizó muestreo in situ de sedimentos a 0,5, 1 y 1,5 m del sitio, en superficie y en profundidad, y de todas las muestras de rocas del área. En una primera fase se aplicó el protocolo de identificación de riesgo biológico. Para ello se utilizó el Bioensayo para la determinación de la toxicidad de aguas superficiales sobre huevos y larvas de pez cebra (NCh 3385/2016). Además, se analizó el contenido gravimétrico de agua, el pH, la conductividad eléctrica de las muestras, la microbiota presente, y el análisis elemental de los sedimentos a través de DRX, FE-SEM e ICP-MS. En una segunda fase se estudió la geología local, la meteorología del día del evento en ese sector, y se describieron las muestras. Se seleccionaron muestras representativas para realizarles imágenes SEM en modo SE y BSE, las que se obtuvieron con un FE-SEM marca Hitachi (MAINI®-UCN). Se realizaron además análisis EDS para obtener mapeo elemental y estereomicroscopio para observación de texturas de interés.

Resultados

El estudio indicó que la ecotoxicidad de las muestras de la zona de estudio es intrínseca al suelo salino del sitio de estudio. Las rocas analizadas corresponden a 2 tipos de productos vítreos asociados a la fusión total o parcial de las rocas del regolito del área: 1) tubos cilíndricos huecos o rellenos, con formas tipo coral, de 1-2 cm de ancho y hasta 10 cm de largo; 2) rocas vítreas negras masivas, con superficies planas, curvadas, que en algunos casos generan estructura en forma de Y. Los mapas elementales muestran que las rocas vítreas masivas tienen predominancia de Si, pero con otros elementos como el Al, Na, Ca, K, Mg, Fe y S en pequeños granos.

Discusiones

Las rocas negras se originaron a partir de procesos que incluyen fusión, desgasificación y solidificación por enfriamiento rápido, que explica el aspecto vítreo, las fracturas conoidales y las vesículas más finas. La presencia de vesículas centimétricas y superficies planas son parecidas a las encontradas en escorias de fundición. Las muestras con esquirlas en forma de Y, con lados convexos, han sido encontradas en rocas volcánicas e interpretadas como fragmentos del fundido solidificado rápidamente alrededor de una burbuja de desgasificación del magma que se enfría en erupciones volcánicas [1]. Por lo que su presencia en las muestras indica generación por fragmentación del fundido rico en volátiles, producido en el evento. Asociadas espacialmente a las rocas negras, se encontraron vidrios con forma de tubos, tipo fulguritas, las que son generadas por la fusión in situ de sedimentos o rocas por una descarga eléctrica de alto voltaje (relámpagos o alguna fuente eléctrica antrópica). Éstas, al tocar sedimentos, generan formas amorfas tubulares que siguen la trayectoria de la descarga eléctrica en el suelo, con todo lo que éste contenga, incluido restos de raíces [2].

Conclusiones

Se concluye que el evento correspondió a una descarga eléctrica de alta energía pero puntual, proveniente de la línea eléctrica aledaña al sitio de estudio. Se descarta la posibilidad de que un relámpago lo haya provocado, dado que no se reportaron tormentas eléctricas para ese día en el sector. Esta descarga eléctrica generó fulguritas (los tubos vítreos) y rocas masivas vítreas. Se descarta la caída de un meteorito o chatarra espacial. Más estudios se requieren para entender los procesos y condiciones para propiciar la fusión total y masiva que generó la roca negra vítreo.

Palabras Clave: Fulguritas, Meteoritos, Chatarra espacial.

Financiamiento: Vicerrectoría de Investigación UCN y equipos MAINI® UCN utilizados: ICP-MS-TQ Programa ANID Fondecip EQM 210025, DRX Proyecto FLate Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and IC-Regional EQU-25 Conicyt 2009-2010 y FE-SEM SU5000-MAINI® UCN 2018.

Agradecimientos: Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo Tecnológico UCN; SENAPRED Antofagasta; Seremi del Ministerio de Ciencias, Tecnología, Conocimiento e Innovación Antofagasta.

Referencias:

- [1] Shelley, D. (1993). Igneous and metamorphic rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred-orientations. (Vol. 445). London: Chapman & Hall.
- [2] Arcioni, J.C, y Gimenez, J.F. 2015. La ionización de los suelos y las corrientes de los rayos a tierra. Artículo técnico, Ingeniería Eléctrica 357.

Proyecto “MYSTHIC - Mobility and Storage of Himalayan Carbon”: Un estudio interdisciplinario del ciclo del carbono en zonas de subducción y colisión

Javier Villalobos Orchard¹, Baptiste Debret¹, Pierre Bouilhol², Céline Pisapia¹, Bénédicte Menez¹, Frédéric Girault¹

(1) Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris Cité, París, Francia

(2) Université de Lorraine, CRPG, Nancy, Francia

El ciclo largo del carbono forma parte fundamental del intercambio químico entre la superficie de la Tierra y su interior, y está íntimamente relacionado con la aparición y el florecimiento de la vida. El equilibrio entre estos reservorios ha sido regulado durante tiempos geológicos principalmente a través de la iniciación y mantención de la actividad tectónica. La subducción de la corteza es capaz de reciclar elementos en el manto, serpentinizando la cuña mantélica mediante fluidos liberados por deshidratación del slab. Este manto serpentinizado puede, en teoría, actuar como un reservorio temporal de elementos, en particular carbono, que pueden ser liberados posteriormente durante reacciones metamórficas progresivas. A su vez, estas especies de carbono generadas abióticamente tienen el potencial de nutrir sistemas biológicos en subsuperficie, para luego ser emitidas hacia la superficie a través de fallas activas. Sin embargo, los procesos que controlan la movilidad y el almacenamiento de carbono durante la subducción y la colisión continental, así como el rol que éstos tendrían en el ciclo del carbono global, las emisiones de carbono y la actividad biológica en subsuperficie, continúan sin comprenderse a cabalidad. Entender dichos procesos podría tener importantes implicancias para nuestra comprensión del ciclo largo del carbono en la Tierra durante escalas geológicas y entregar luces sobre el origen y mantención de la vida, tanto en la Tierra como potencialmente en otros cuerpos planetarios.

En este contexto, el proyecto “MYSTHIC: Mobility and Storage of Himalayan Carbon” tiene como objetivo evaluar y caracterizar los procesos de almacenamiento y movilidad de carbono en el Himalaya, un sitio geológico único donde es posible estudiar los flujos de carbono asociados a un ciclo tectónico completo, desde la subducción oceánica, seguida de una subducción continental y culminando en la formación de cordones montañosos mediante colisión. Este laboratorio natural permite así estudiar el ciclo del carbono desde el manto superior hasta la zona crítica, interfaz entre la litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera. Sirviéndose de un enfoque interdisciplinario, donde se unen la petrología, la geoquímica y la geomicrobiología, el proyecto “MYSTHIC” busca responder: (1) cuál es el rol del manto serpentinizado como almacenamiento temporal de carbono en profundidad, (2) cuáles son las formas de carbono que sostendrían la vida en subsuperficie y el impacto de ésta en los flujos de carbono hacia la superficie, y (3) cómo varían las emisiones de carbono superficiales actuales en fallas activas en los Himalayas y cómo estas se relacionan con emisiones profundas y pasadas. De esta forma, nuestro estudio proporciona una mirada más completa a una parte del ciclo del carbono poco comprendida hasta ahora, contribuyendo a conectar los procesos profundos derivados de la transferencia de masa entre la corteza subducida y el manto, con los procesos y flujos de carbono superficiales que forman parte ciclo biogeoquímico en la Tierra.

Palabras Clave: ciclo del carbono, serpentinitas, zonas de subducción, cuña mantélica, colisión continental.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por LabEx UnivEarthS (proyectos ANR-10-LABX-0023 y ANR-18-IDEX-0001).

Relación entre la composición de la superficie, la geomorfología y la ocurrencia de torbellinos de polvo en la cuenca de Hellas en hemisferio sur de Marte, durante los años marcianos 28, 31 y 34

Javier Armijo Quiñones¹⁻²⁻³, Priscilla Nowajewski²

(1) Universidad Andres Bello, Viña del Mar

(2) Observatorio ALMA, The Mars Society Chile

(3) Laboratorio de análisis isotópico (LAI), The Mars Society Chile

The Hellas Basin, located in the southern hemisphere of Mars, stands as the planet's deepest point, characterized by a history of heightened dust storm activity spanning the past ten Martian years. This study employs ephemeral dust devil tracks as indicators of elevated dust lifting events and employs advanced analytical techniques to elucidate the relationship between surface composition, morphology, and dust devil occurrence. Utilizing data obtained from the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) hyperspectral imaging system and nearly 1,000 High Resolution Imaging Science Experiment (HIRISE) images aboard NASA's Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), we investigated this intricate interplay.

The data, sourced from NASA's Planetary Data System (PDS), underwent meticulous processing using the ISIS3 platform, employing specialized pipelines for both instruments, before being integrated into a geographical information system. Our findings reveal the pivotal role played by ferromagnesian minerals, notably fosterite and fayalite within olivine, along with high calcium and low calcium pyroxene, and iron oxides, such as hematite, in unconsolidated sediments within the basin. These constituents are instrumental in generating dust devils by effecting significant surface heating during the diurnal period, particularly at mid-day in the southern hemisphere, thereby establishing the requisite thermal differentials for the manifestation of this phenomenon.

Furthermore, our investigation identified a discernible geomorphological influence on the predominant orientations of dust devil tracks, further underlining the complex relationship between surface features and dust devil activity. Additionally, a pronounced association with seasonal variability was observed, with heightened activity during the spring and summer seasons of the southern hemisphere, periods coinciding with the occurrence of large-scale dust storms. This study represents a comprehensive advancement in understanding the dynamic processes governing atmospheric interactions with the Martian surface within the Hellas Basin region. The insights garnered herein not only contribute to a broader comprehension of Martian atmospheric dynamics but also serve as a critical foundation for future missions targeting this geologically intriguing and climatically dynamic locale.

Palabras clave: (1) Hellas Basin, (2) Mars, (3) Dust Devils, (4) Hyperspectral, (5) Mineralogy.

Cambios mineralógicos y desestabilización de C orgánico durante el reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales en suelos del centro-sur de Chile

Pamela Castillo Lagos¹⁻⁵, Felipe Aburto Guerrero¹⁻², María Fernanda Albornoz³, Oscar Crovo⁴, Maite Aguilar⁶,
 Fernanda Álvarez Amado⁶

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Planificación Territorial y Sistemas Urbanos, Facultad de Ciencias Ambientales

(2) Texas A&M University, Soil and Crop Sciences Department

(3) Universidad de la Frontera, Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales

(4) Universidad de Concepción, Foresta Nativa

(5) Universidad Andrés Bello, Geología, Concepción

(6) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción

En Chile y a escala global, el reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales ha generado numerosos impactos ambientales, tales como efectos sociales, pérdida de biodiversidad y alteración de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos. Además, varios trabajos han reportado cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos debido a la conversión de bosques caducifolios por coníferas. Los efectos observados en el suelo varían entre: disminución de cationes intercambiables, acidificación, modificaciones en la composición de la materia orgánica, pérdida de nutrientes y alteraciones en el ciclo del carbono. Sin embargo, transformaciones en la mineralogía del suelo han sido poco estudiadas o limitadas al reconocimiento de horizontes superficiales (< 1 m de profundidad). Actuales avances en técnicas micro- y nano-analíticas han mostrado el rol clave que juega la mineralogía en la protección, estabilización y secuestro del carbono orgánico (SOC) en el suelo, un aspecto crucial en la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

En la zona centro-sur de Chile (37°-38.5°S) se seleccionaron cinco sitios con diferentes tipos de suelo y materiales parentales, en donde bosques nativos (NF) coexistieran en proximidad con plantaciones de *Pinus sp* (PL). En cada sitio se establecieron dos parcelas pareadas (una en NF y otra en PL), en donde se estudiaron perfiles de suelos de 2.4 m de profundidad, los que se muestrearon por horizontes genéticos para realizar: i) caracterización y semicuantificación de la mineralogía del suelo mediante difracción de rayos X (XRD) y el software NEWMOD; ii) análisis químicos (pH y contenido SOC y cationes intercambiables); iii) disoluciones selectivas para cuantificación de Fe, Al y Si en fases semi-cristalinas, amorfas y organometálicas del suelo y iv) análisis físicos (textura, densidad aparente, humedad y agua disponible a las plantas).

Los suelos estudiados provienen de materiales parentales cristalinos como i) esquistos (SCH-Ultisol) y ii) granitos (GR-Alfisol), ubicados en la Cordillera de la Costa y de materiales piroclásticos de diferentes edades: suelos de depósitos de composición intermedia en la Depresión Central, iii) "Old Ash" (OA-Alfisol), y en la Precordillera, iv) "Young Ash" (YA-Andisol), y suelos en depósitos andesítico-basálticos más recientes del Complejo del Volcán Lonquimay v) (RA-Entisol). Estas diferencias en los materiales parentales determinan características mineralógicas de primer orden entre los suelos estudiados.

Al comparar los suelos desarrollados bajo PL con los de NF, en la mayoría de los suelos observamos algunos cambios esperados, tales como disminución en los contenidos de SOC y cationes intercambiables, además de acidificación, principalmente en los horizontes intermedios y profundos. Adicionalmente, nuestros resultados muestran transformaciones mineralógicas en la fracción arcilla, así como cambios en los contenidos de Fe y Al, asociados a fases semi-cristalina, amorfa y organometálicas, los cuales pueden relacionarse al cambio de uso de suelo. Los principales procesos responsables de estas transformaciones mineralógicas fueron la acidificación, translocación de Al³⁺ y deshidratación de los suelos. Aun cuando, cada sitio responde de manera particular a estos cambios, comprobamos que aquellos suelos que experimentan mayores transformaciones mineralógicas (GR-Alfisol y YA-Andisol) son también los que presentan mayores disminuciones en los contenidos de SOC y de fases órgano-metálicas. Por el contrario, los suelos con menores cambios mineralógicos en la fracción arcilla fueron más resilientes a estas alteraciones.

Nuestros avances en esta temática destacan el rol de las transformaciones mineralógicas en los procesos de desestabilización del carbono orgánico en los suelos, como un aspecto poco abordado entre los impactos negativos que ha tenido la conversión de millones de hectáreas de bosques nativos en plantaciones forestales a escala global.

Palabras Clave: Mineralogía de arcillas, Plantaciones forestales, Biogeoquímica, Carbono orgánico del suelo.

Financiamiento: Proyecto ANID de Cooperación Internacional MPG-190022 de Universidad de Concepción e Instituto Max Planck de Biogeoquímica: "Forest Carbon Associative Research: Quantifying the effect of forest use intensification on soil carbon stabilization processes". Proyecto VRID Investigadoras N° 2022000571 de la Universidad de Concepción: "Efecto del cambio de uso de suelo en la geoquímica de la Cuenca de Nonguén y su impacto en la meteorización química".

Agradecimientos: La autora principal agradece al Proyecto VRID Investigadoras N° 2022000571 de la Universidad de Concepción por permitir la difusión de este trabajo.

Procesos de mineralización en la Zona Crítica: simulación del enriquecimiento supérgeno de cobre mediante modelos de transporte reactivo

Antonia Clericus¹, Martin Reich¹, Alida Pérez-Fodich¹, Fernando Barra¹, Irene del Real²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Independencia 631, Valdivia, Chile

Resumen

La meteorización y erosión son mecanismos fundamentales para el enriquecimiento secundario de metales con interés económico como el cobre (Cu), un elemento sustancial para la sociedad del siglo 21 y componente clave para la descarbonización y transición energética. Es en la Zona Crítica donde los procesos de oxidación y lixiviación conjuntamente intervienen en rocas mineralizadas con sulfuros hipógenos de Cu, derivando en un aumento de entre tres y hasta cuatro veces el contenido de Cu inicial. A este fenómeno, producido una vez que los depósitos son exhumados en superficie, se le conoce como enriquecimiento supérgeno de Cu [1]. Los factores principales que controlan el enriquecimiento secundario son el contenido mineral de la roca huésped y composición del protolito, el cual está asociado al tipo de yacimiento (IOCG, pórfido de Cu o estratoligados de Cu). Un tercer factor relevante es la evolución paleogeomorfológica, determinada por procesos hidrológicos y pedológicos, unidos a la evolución geodinámica del orógeno. Finalmente, el cuarto factor es el clima, especialmente la temperatura y la intensidad de las precipitaciones, que impactan en las tasas de evapotranspiración y la actividad biológica [1,2].

Los procesos de enriquecimiento supérgeno de Cu actúan en escalas de tiempo geológico (10^4 a 10^6 Ma), de modo que en muchos casos no es posible reconstruir la evolución geoquímica completa de los cuerpos mineralizados supérgenos. En tales circunstancias, los modelos numéricos juegan un rol importante al proporcionar más información sobre la interacción entre factores geológicos, geomorfológicos y climáticos, que controlan el desarrollo a largo plazo de perfiles supérgenos. A la fecha, pocos estudios son los que han abordado este problema desde el enfoque de la simulación numérica [3,4]. El uso de esta herramienta proporciona una oportunidad para comprender mejor las relaciones entre la meteorización química, la oxidación y la precipitación secundaria de Cu, incorporando las escalas temporales y condiciones ambientales asociadas a estos procesos, una aplicación relativamente inexplorada hasta ahora.

En este estudio se pretende simular numéricamente el proceso de enriquecimiento supérgeno de Cu utilizando modelos de transporte reactivo. Con este fin, se evalúan escenarios de enriquecimiento enfocados en los depósitos de Cu a lo largo de la Cordillera de la Costa del centro-norte de Chile, la cual presenta abundancia de sistemas de tipo IOCG, estratoligados Cu-(Ag) y pórfido Cu-Mo. Los yacimientos de Cu de esta importante provincia metalogénica se caracterizan por perfiles de enriquecimiento secundario bien desarrollados, algunos de los cuales pueden alcanzar más de 100 metros de espesor. Las observaciones en campo, los análisis mineralógicos/geoquímicos y los datos geocronológicos se utilizan para definir las condiciones de borde necesarias para la modelación numérica.

Las simulaciones se implementan en el código de transporte reactivo CrunchFlow [6], el cual permite describir simultáneamente el transporte advectivo de solutos en medios porosos no saturados y saturados, en conjunto con la interacción química entre el fluido y el medio poroso, incorporando la cinética de reacción para la disolución y precipitación de minerales. En el marco del presente estudio, los modelos numéricos procuran investigar los factores que afectan el desarrollo de la mineralogía supérgena, el grado de enriquecimiento, y el espesor del perfil de enriquecimiento supérgeno. Para ello, las simulaciones evalúan los siguientes escenarios: (1) influencia del protolito (ej., contenido de sulfuros hipógenos, relación pirita vs. sulfuros de Cu, mineralogía de alteración); (2) el efecto de la saturación del medio poroso; y (3) rol de la tasa de exhumación/erosión. Los resultados de estas simulaciones permitirán establecer los controles primarios en el desarrollo de enriquecimiento supérgeno en distintos tipos de depósitos de Cu presentes en la Cordillera de la Costa de Chile.

Palabras Clave: Enriquecimiento supérgeno, Transporte reactivo, Zona Crítica.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo de ANID a través del proyecto FONDECYT Regular #1230161.

Referencias:

- [1] Reich, M., Vasconcelos, P. (2015) Geological and economic significance of supergene metal deposits. *Elements* 11, 305–310.
- [2] Sillitoe, R.H. (2005) Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume SEG, 723–768.
- [3] Ague, J.J., Brimhall, G. (1989) Geochemical modeling of steady state fluid flow and chemical reaction during supergene enrichment of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.* 84, 506–526.
- [4] Xu, T.F. et. (2001) Modeling multiphase non- isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 2. Applications to supergene copper enrichment and hydrothermal flows. *Am. J. Sci.* 301, 34–59.
- [5] Barra, F. et al. (2017) Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geol. Rev.* 81, 62–78.
- [6] Steefel, C. I., Appelo, C. A. J., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V., Lichtner, P. C., Mayer, K. U., Meeussen, J. C. L., Molins, S., Moulton, D., Shao, H., Simunek, J., Spycher, N., Yabusaki, S. B., and Yeh, G. T. (2015) Reactive transport codes for subsurface environmental simulation: *Comp. Geosciences*, 19(3), 445–478.

Efectos de coberturas y usos de suelos en la erosión a partir del estudio de elementos traza y $\delta^7\text{Li}$ en sedimentos en suspensión y aguas de la Cuenca de Nonguén

Angela Esperanza Contreras Gatica¹, Fernanda Álvarez Amado¹, Violeta Tolorza Tolorza²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

En Chile el manejo de las plantaciones forestales está asociado a mayores tasas de erosión de suelo (e.g., Aburto y otros, 2021) que las coberturas de bosque nativo, aportando mayor cantidad de sedimentos debido a la elaboración de caminos, tala rasa en períodos cortos de rotación y el reemplazo de la vegetación, lo que modifica varias propiedades del suelo, como la capacidad de infiltración, el contenido de carbono, la biodiversidad de invertebrados, entre otras (e.g. Cifuentes-Croquevielle y otros, 2020).

La Cuenca de Nonguén constituye un objeto de interés, debido a la amplia variedad de coberturas y usos de suelos presentes en su extensión, además de ser una fuente principal de agua potable para las comunidades cercanas, por lo que entender la relación y efectos provocados por usos de suelos y coberturas (en especial de tipo forestal) en las aguas es primordial en zonas donde es empleada para uso humano, así como su relación con procesos geológicos como la erosión y/o meteorización.

Para establecer los efectos que producen las plantaciones de tipo forestal se analizaron las concentraciones de elementos traza y $\delta^7\text{Li}$ en tres subcuencas (S, N y W) comprendidas dentro de la Cuenca de Nonguén, con el fin de determinar si existe relación entre esto último y la erosión dentro de cada una. Dichas subcuencas presentan características similares (igual orden de Strahler, litología y pendientes), diferenciándose en las coberturas y usos de suelos que dominan en cada una, siendo el rasgo distintivo el área ocupada por plantaciones forestales (W=61%, N=32% y S=24%).

A partir de los resultados se evidenció un incremento en la concentración de elementos traza en sedimentos en suspensión en aquellas subcuencas con mayor dominio de plantaciones forestales, siendo la subcuenca W la que posee los mayores valores. En contraste, la subcuenca S posee menores concentraciones de elementos traza y corresponde a la subcuenca con mayor área de bosque nativo.

De manera general, se observa una tendencia W-N-S de las subcuencas, cuyo contenido geoquímico disminuye desde la subcuenca W a la S, lo anterior asociado al grado de deforestación en cada subcuenca.

Para el caso del contenido isotópico de Li, las subcuencas no presentan grandes diferencias entre ellas, siendo similar tanto para muestras de aguas como para sedimentos en suspensión.

La diferencia en las concentraciones se debe a una mayor erosión física asociado a los efectos de las coberturas y usos de suelos de tipo forestal. Las plantaciones de tipo forestal, en especial en la subcuenca W producen un mayor aporte de sedimentos hacia los ríos debido a la degradación del suelo, asociado a su vez a actividades como tala rasa que se evidencian en esta subcuenca.

En base al contenido isotópico no se evidencian cambios en la meteorización de manera significativa, por lo que no es posible establecer una relación clara entre este proceso y el tipo de uso y cobertura presente. Lo anterior debido a que los productos formados por el proceso de meteorización no producen un fraccionamiento isotópico intenso, por lo que no se refleja como una diferencia entre las subcuencas.

Palabras Clave: Erosión, Plantaciones forestales, Isótopos de Li.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt 11190864.

Agradecimientos: Agradecer al proyecto Fondecyt 11190864, gracias al cual fue posible financiar y llevar a cabo este estudio.

Referencias:

- Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., & Rubilar, R. (2021). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation & Development*, 32(1), 453-466.
- Cifuentes-Croquevielle, C., Stanton, D. E., & Armesto, J. J. (2020). Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.

Análisis de la influencia de factores de formación de suelo y manejo agrícola en el contenido de carbono orgánico de suelos vitivinícolas de Chile Central

Edwin González Abarca¹, Eduardo Arellano Ogaz², Marcelo Miranda², Jorge Mora F.², Nadia Rojas Arévalo²

(1) Servicio Nacional de geología y Minería, Departamento de Geología General, Santa María #0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Center of Applied Ecology and Sustainability, Departamento Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Monseñor Carlos Casanueva 547, Macul, Santiago, Chile

La agricultura es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y es responsable de aproximadamente un quinto de las emisiones globales (IPCC, 2014). En particular, los sistemas intensivos con altos requerimientos de insumos tienen un impacto significativo en el medio ambiente, causando degradación de los suelos, deforestación, pérdida de biodiversidad, agotamiento de los suelos, contaminación del aire y agua. Además de los altos niveles de emisiones de GEI resultan una gran amenaza para la seguridad alimentaria y gran impulsor de cambios globales (IPCC, 2014; Büchi et al., 2022). Sin embargo, la agricultura en el entorno rural representa un sistema multifuncional capaz de proveer importantes servicios económicos, culturales y ecológicos a las comunidades locales y sistemas globales, incluyendo el secuestro de carbono (Winkler et al., 2017; Chiriaco et al., 2019).

Los viñedos en climas mediterráneos y áreas templadas son un potencial buen ejemplo, de cómo cultivos agrícolas perennes pueden almacenar carbono en su tejido leñoso permanente y en los suelos (Zalesny et al., 2016; Williams et al., 2020) con una potencial contribución a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, el manejo agrícola intensivo de los viñedos y el sistema productivo vitivinícola tienen el potencial de exacerbar o mitigar las emisiones de GEI, pudiendo anular o incluso revertir los efectos positivos del secuestro de carbono y su potencial efecto mitigador ante el cambio climático (Chiriaco et al., 2019).

Para aprovechar el potencial de mitigación de GEI en la vitivinicultura, es necesario mejorar nuestro entendimiento específico sobre el almacenamiento a largo plazo de carbono en las viñas. Es importante determinar en qué partes o profundidades ocurre principalmente la acumulación de carbono, cuál es la capacidad de estos reservorios, las tasas de acumulación y las prácticas de manejo que los afectan (Brunori et al., 2016; Williams et al., 2020), así como los principales factores o covariables que influyen en estos procesos (Vos et al., 2019).

En este estudio, fueron utilizados métodos de aprendizaje de máquinas, como el algoritmo de reducción de dimensionalidad de variables basado en bosques aleatorios BORUTA y modelos aditivos generalizados (GAM), para analizar el efecto de 48 variables edafo y topoclimáticas en el contenido de carbono orgánico de suelos de Chile Central. Fueron muestreados 205 puntos en 5 predios vitivinícolas de las regiones de O'Higgins y Maule, a 15 y 30 cm de profundidad. Las variables numéricas y categóricas corresponden a propiedades del suelo (pH, textura, conductividad eléctrica), clima (temperaturas medias y precipitaciones), relieve (altura, exposición, pendiente, etc.), vegetación, litología del material parental y manejo agrícola. En esta última categoría, fueron consideradas variables como la edad de plantación, tipo y frecuencia de arado, riego, presencia de vegetación espontánea y fertilización.

Los procesos que influyen en la degradación y fijación de carbono orgánico en los suelos son complejos y poco entendidos, e incluso contradictorios (Vos et al., 2019), pero responden a factores ambientales como el aumento de la temperatura de los suelos, la materia vegetal, el tipo de sistema de cultivo, las cualidades físicas del suelo, las propiedades biológicas de la parra y de manera relevante, al tipo de manejo del cultivo (Brunori et al., 2016; Schultz, 2022). Los resultados preliminares nos muestran que los modelos aditivos generalizados nos permiten explicar hasta un 52% de la variabilidad del contenido de carbono orgánico de los suelos estudiados y que las covariables de mayor influencia corresponden a temperaturas medias, altura topográfica, material parental, contenido de arcillas y frecuencia de arado.

El suelo es potencialmente la más significativa fuente de carbono en el ecosistema vitivinícola, y un buen entendimiento de los impulsores y técnicas de modelado eficientes para evaluar el potencial incremento del almacenamiento de COS, junto con una buena calibración de los modelos de procesos de manejo de viñas, son vitales para evaluar su rol en el ciclo global del carbono y permitir un mayor entendimiento del impacto de las decisiones de manejo y su efecto en las dinámicas de carbono de los suelos agrícolas (Longbottom y Petrie, 2015; Wang, et al., 2018; Williams et al., 2020).

Palabras Clave: Carbono orgánico, suelo, viñedos, Chile, aprendizaje de máquinas.

Referencias:

- Brunori, E., Farina, R., Biasi, R. 2016. Sustainable viticulture: The carbon-sink function of the vineyard agro-ecosystem. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 223.
- Büchi, L., Walder, F., Banerjee, S., Colombi, T., ..., Charles, R., Six, J. 2022. Pedoclimatic factors and management determine soil organic carbon and aggregation in farmer fields at a regional scale. *Geoderma*, 409.
- Chiriaco, M., Belli, C., ..., Sabbatini, S. 2019. The potential carbon neutrality of sustainable viticulture showed through a comprehensive assessment of the greenhouse gas budget of wine production. *Journal of Cleaner Production*, 225.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Longbottom, M., Petrie, P. 2015. Role of vineyard practices in generating and mitigating greenhouse gas emissions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21.
- Schultz, H. 2022. Soil, vine, climate change; the challenge of predicting soil carbon changes and greenhouse gas emissions in vineyards and is the 4 per 1000 goal realistic? *OENO One*, 56.

- Vos, C., Don, A., ..., Freibauer, A. 2019. Factors controlling the variation in organic carbon stocks in agricultural soils of Germany. European Journal of Soil Science, 70.
- Wang, H., ..., X., Wang, R., Li, J. 2018. Tillage system change affects soil organic carbon storage and benefits land restoration on loess soil in North China. Land Degradation & Development, 29.
- Williams, J., Morandé, J., ..., Viers, J. 2020. Ecosystem services in vineyard landscapes: a focus on aboveground carbon storage and accumulation. Carbon Balance and Management, 15.
- Winkler, K., Viers, J., Nicholas, K. 2017. Assessing ecosystem services and multifunctionality for vineyard systems. Frontiers in Environmental Science, 5.
- Zalesny Jr, R., Stanturf, J., Gardiner, E., Perdue, J., Young, T. 2016. Ecosystem Services of Woody Crop Production Systems. 335.

Influence of Land use on morphological, physicochemical, and mineralogical properties of Aquands in Southern Chile

Belén Henríquez Caurapan¹, Franz Zehetner², Franz Ottner³, Susana Valle⁴

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Valdivia, Chile.

(2) University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Forest and Soil Sciences, Institute of Soil Research, Vienna, Austria

(3) University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Institute of Applied Geology, Vienna, Austria

(4) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Centro de Investigación en Suelos Volcánicos (CISVo), Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Valdivia, Chile

Aquands (waterlogged volcanic ash soils, locally called “Ñadi”), are young and shallow volcanic soils developed over poor drainage conditions located in the central longitudinal valley between the Coastal Range and the Andean Range. The land use change (LUC) in Aquands was produced because of the need for new agricultural or forestry land. In this aspect, land-use change and land-use intensification (e.g., agricultural and plantations) have been identified as the main global change driver worldwide. The objective of this study was to identify the influence of the effect of LUC on the morphological, mineralogical, and physicochemical properties of an Acrudoxic Duraquand. The soil characterization and sampling were conducted in four different land use: forest (natural condition > 50 years), cropland (>5 years, before that under forest plantation >25 years), grassland (>30 years), and Eucalyptus plantation (>30 years). Soil samples were collected for each described horizon. The results show that there is an influence of the land use change, decreasing the organic carbon content and the air capacity while increasing the bulk density according to the intensity of use (cropland>grassland>plantation>forest). Similarly, an effect on the morphological properties with the loss of the organic horizon in all anthropic uses. Also changes in the soil structure, having changed from granular structure (forest) to massive (cropland). And the loss of the first horizon in cropland which presented 3 of the 4 horizons described in the natural condition. According to the mineralogical analysis, the soils under native forest and cropland have similar characteristics in their composition, presenting traces of crystalline minerals and short-range-order (SRO) minerals. While the soils under grassland and plantation the short-range-order (SRO) minerals (allophane and ferrihydrite) dominated in the colloidal fraction, increasing the $\text{Al}_\text{o} + \frac{1}{2}\text{Fe}_\text{o}$ as well as $\text{Al}_\text{p}/\text{Al}_\text{o}$ content in their composition. Also presented typical morphological characteristics described for a Ñadi. In this aspect, the four land uses have been described as part of the same soil series (CIREN, 2003). However, according to mineralogical analysis, grassland and plantation are part of the same soil series (Huiti), and forest and cropland could be part of other soil series. In summary, the effect of soil land use change was mostly in the first and second horizons, the cropland is the use with the greatest impact on the different properties evaluated. Finally, it was determined that the differences in mineralogical characteristics between land uses are not associated with anthropogenic use, but rather with variability in the genesis of volcanic soils.

Keywords: Waterlogged volcanic ash soils, Land use change, Mineralogy, Soil genesis.

Financing: Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, becas de doctorado ANID núm. 21200549.

References:

- Candra, I. N., Gerzabek, M. H., Ottner, F., Wriessnig, K., Tintner, J., Schmidt, G., ... & Zehetner, F. (2023). Soil formation and mineralogical changes on basaltic lava vs scoria along a hydroclimatic gradient on Santa Cruz Island, Galápagos. CATENA, 220, 106696.
- CIREN. (2002). Descripciones de Suelos, Materiales y Símbolos. Estudio Agrológico IX Región. Publicación Ciren N° 122, 360.
- Zúñiga, F., Dec, D., Valle, S. R., Thiers, O., Paulino, L., Martínez, O., ... & Dörner, J. (2019). The waterlogged volcanic ash soils of southern Chile. A review of the “Ñadi” soils. Catena, 173, 99-113.

Identificación del protolito a partir de las características mineralógicas de la fracción fina del suelo. Caso de estudio: Mapeo regional en Cauquenes, Región del Maule, Chile

Matías Felipe Henríquez Mella¹, Natalia Astudillo², Camilo Sánchez¹⁻³, Eugenia Fonseca²

(1) Universidad Mayor, Geología, Chile
(2) Servicio Nacional de Geología y Minería
(3) Cobrizo Geología Ambiental

Una de las principales actividades que se realizan en el quehacer geológico corresponde a la construcción de mapas geológicos, los cuales se basan en el reconocimiento y clasificación litológica. Sin embargo, en lugares donde los afloramientos rocosos son escasos, es difícil poder obtener información de la litología, producto de que las rocas están cubiertas por distintos materiales, entre los que se encuentran, el gran desarrollo de suelos; situación que se reconoce en el centro sur de Chile, como lo es en la provincia de Cauquenes, Región del Maule. En esta localidad, la formación de suelos y la gran capa vegetal cubren los afloramientos de rocas, y, por ende, dificultan la construcción de mapas geológicos locales.

Es por esto por lo que identificar la relación entre las características mineralógicas de los suelos formados *in situ* y los protolitos del material parental, podría facilitar el reconocimiento litológico y mejorar el desarrollo de mapas geológicos. De esta forma, en esta investigación se plantea el desarrollo de una metodología capaz de poder reconocer cuál es la litología que estuvo alguna vez aflorando en un lugar determinado, a partir de las características físicas, químicas y mineralógicas presentes en la fracción fina del suelo. Estas características se pueden dividir en las formadas en el suelo *in situ*, o en aquellas que son heredadas de la roca precursora. Para esto, se realizaron análisis texturales, medición de parámetros fisicoquímicos, química total del suelo, se determinó el índice de meteorización y se identificaron las fases minerales presentes.

Las muestras analizadas corresponden a suelos formados *in situ* a partir de distintos tipos de roca entre intrusivos ígneos, rocas metamórficas foliadas, tobas intermedias y sucesiones sedimentarias, tanto marinas como continentales. Estas se encuentran en distintos contextos geomorfológicos, como lo son cimas y fondos de quebradas de la cordillera de la costa, influenciadas por distintos tipos de vegetación.

Entre las muestras analizadas, se puede apreciar que aquellos provenientes de rocas ígneas intrusivas presentan texturas predominantemente gruesas a través de sus horizontes además de una tendencia al empobrecimiento químico conforme aumenta la profundidad de los horizontes, mineralogía de arcillas relictas de procesos hidrotermales como la dickita, mientras que entre las arcillas formadas *in situ* se encuentran la caolinita y la montmorillonita, con presencia de illita. Por otro lado, los suelos provenientes de rocas metamórficas presentan texturas que se distribuyen hacia aquellos más ricos en fragmentos tamaño arcilla junto a un empobrecimiento químico conforme aumenta la profundidad de la muestra, en cuanto a su mineralogía, sus arcillas relictas corresponden a clorita y sericita, mientras que en las arcillas formadas *in situ* se encuentran la vermiculita y la caolinita.

A partir de esto, se puede decir que aquellos suelos que tengan una predominancia de texturas gruesas, arcillas del grupo de la caolinita, y montmorillonita como exponente del grupo de la esmectita corresponden a suelos con protolito ígneo intrusivo. Por otro lado, aquellos suelos que presenten una distribución textural con aumento en la cantidad de fragmentos tamaño arcilla, sericita como mineral de arcilla predominante, ricos en clorita, y vermiculita como arcilla del grupo de la esmectita, pertenecen a aquellos con protolito metamórfico.

Por lo que la metodología propuesta corresponde a la categorización textural de las muestras observando su distribución en el triángulo de clasificación textural de la *United States Department of Agriculture* (USDA); teniendo en cuenta la mineralogía, asociando los minerales anteriormente identificados con el grado de empobrecimiento químico calculado con el *Silica-Titanium Index* (Jayawardena & Izawa, 1994), y así proponer el protolito que corresponda. Todos estos criterios son complementarios y otorgan distintos grados de certeza de la identificación.

Palabras Clave: Geología ambiental, Suelo, Mineralogía, Geoquímica, Meteorización.

Financiamiento: Gracias al departamento de geología regional de la subdirección nacional de geología del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), que en el contexto del Plan Nacional de Geología y la elaboración de mapas geológicos surge la necesidad de este proyecto donde se realizaron distintos análisis en los laboratorios de mineralogía, de química y de separación de muestras; de los cuales se les agradece encarecidamente a todo(a) aquel(la) funcionario(a) que aportó con su expertise, profesionalismo y calidez; donde se realizaron análisis tales como difracción de rayos X y química total, y por último se nos hizo la entrega de muestras e instalaciones para poder trabajar. Gracias a la escuela de geología de la Universidad Mayor por financiar los terrenos donde se pudo contextualizar el área de trabajo de donde se obtuvieron las muestras, además se realizaron análisis fisicoquímicos *in situ*.

Agradecimientos: Agradecer a las PhD. Natalia Astudillo por integrarme en este proyecto y Eugenia Fonseca, geóloga experta en Difracción de Rayos X por realizar la interpretación de los difractogramas, entre otros.

Referencias:

- Jayawardena, U. D. S., & Izawa, E. (1994). A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka. *Engineering Geology*, 36(3-4), 303-310.

Comprensión de los cambios físicos en el suelo por la presencia irrigación y cultivos, mediante métodos geofísicos: Caso de almendros y manzanos en Pirque, Chile

Catalina Constanza Lizarde Garrido¹, Gonzalo Yáñez Carrizo¹, Jaime Araya Vargas², Pilar Macarena Gil³, Víctor García³, Francisco Meza³, Fernanda Gallegos Poch¹, Ignacio Zúñiga⁴, Camila Leiva¹, José Schmidt³, Jorge Sanhueza¹, María Jesús Veloso³, Jael Montecinos³

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotécnica, Ingeniería

(2) Universidad de Atacama, Geología, Ingeniería

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Agronomía e Ingeniería Forestal

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Matemática, Ingeniería

La Zona Crítica (ZC) es el lugar en los primeros metros de profundidad, donde ocurren las interacciones entre suelo, agua, aire y vida. Un ecosistema dinámico que genera cambios entre sus agentes. El estudio de la ZC se torna particularmente importante cuando se considera que de esta depende la subsistencia de la vida en cuanto a alimentación, agua y oxígeno. Las plantaciones agrícolas dependen fuertemente de la calidad del suelo, la disponibilidad de agua y el clima. Es por ello por lo que es crucial estudiar estas propiedades antes de la plantación y también durante su uso, ya que las condiciones del suelo cambiarán debido a la presencia de plantas y la irrigación.

En el caso de Chile, el manejo de riego agrícola suele hacerse a partir de fuentes subterráneas (pozos) o canales cercanos a las inmediaciones del huerto, que conducen aguas provenientes de ríos. Estas aguas pueden pasar por tratamientos de mejora, pero en general no es posible eliminar la fracción de arcillas, las cuales precipitarán y cambiarán el terreno. El propio flujo del agua en el subsuelo generará canales secundarios. Al igual que las interacciones de la propia planta con el suelo y la atracción de microorganismos a esta traerán cambios en la porosidad y en el contenido de biomasa.

El uso de métodos geofísicos de alta resolución espacial para el estudio de la ZC y, en particular, de los predios agrícolas es una metodología novedosa que ha demostrado ser una herramienta útil en las últimas décadas. En particular los métodos eléctricos de corriente continua (ERT) como electromagnéticos (FDEM) se han utilizado para determinar la resistividad eléctrica e inferir humedad. Estos estudios se complementan con tomografías sísmicas para la estimación de porosidad y polarización Inducida (IP), para diferenciar la componente de humedad asociada al contenido de arcillas en los valores de resistividad.

La hipótesis de trabajo es que es posible observar cambios en los valores de resistividad eléctrica y velocidad de ondas sísmicas generados en el suelo por la presencia de plantaciones y riego en comparación a suelos vírgenes de un mismo predio. Para el caso de estudio, se utilizó el Fundo de Agronomía UC, ubicado en la comuna de Pirque, Chile. Este sitio cuenta con un riego controlado, estudios de calidad del agua y sondas de medición de humedad tipo FDR, comúnmente implementadas en agronomía para realizar mediciones puntuales, esto permite la correcta interpretación de los datos geofísicos. Se consideraron tres sitios de medición: Suelo Virgen (VIR) y plantaciones de Almendros (ALM) y Manzanos (MAN).

Resultados preliminares indican que el contenido de arcillas aumenta (30-40%) entre la superficie y el primer metro de profundidad en todos los sectores. Los sectores regados presentan un aumento en el contenido de arcillas con respecto a VIR, siendo MAN el sector con los valores más altos. En cuanto a la porosidad, en el sector VIR es constante en profundidad y lateralmente (~35%), mientras que en las plantaciones se generan heterogeneidades en los primeros metros y el valor de porosidad aumenta (40-50%). Se interpreta entonces que existen cambios en el suelo que serían atribuibles a la actividad agrícola. Se postula que estos procesos podrían diferenciarse entre los biológicos o de transferencia de biomasa y los hidrológicos asociados a la generación de canales secundarios en el suelo producto de la irrigación.

Palabras Clave: Zona Crítica, Geofísica, Agricultura, Sistemas Intervenido.

Financiamiento: Fondecyt 1210526 Corfo.

Agradecimientos: Agradecemos al proyecto Fondecyt 1210526 y Corfo por el financiamiento para realizar los estudios.

Spatial and temporal dynamics of solute sources and fluxes in a Mediterranean catchment of Central Chilean Cordillera

Marcos Simón Macchioli Grande¹, Agustín Soto Maass¹, Javiera González¹, Marco Pfeiffer², Alida Pérez-Fodich¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Avenida Santa Rosa 11315, Santiago, Chile

Solute generation and its export to rivers is a result of different processes that occur in the Critical Zone. The interplay between chemical weathering, climatic and tectonic forcing, and biotic effects controls the hydrochemical signal, and thus water quality (Chorover et al., 2017). The Maipo catchment is a natural laboratory for this kind of studies, since it is a tectonically active basin with different lithologies, with a Mediterranean climate strongly affected by the Chilean Mega Drought (Garreaud et al., 2020). To assess the spatial and temporal variability of solute sources and fluxes, we selected two areas with minimal to zero influence of mining activities. These are the Mapocho sub-catchment (including the Mapocho river plus Molina and Covarrubias streams) and the Maipo main river catchment (including the Maipo river plus Yeso, Manzano and Volcán streams). We conducted monthly sampling for major ions and other geochemical and isotopic tracers such as Ge/Si and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios, along with measures of instantaneous discharge between August 2021 and August 2022.

Major ions concentration is one order of magnitude higher at the Maipo catchment than at the Mapocho sub-catchment. Streams at the Maipo area yielded ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr between 0.70589–0.70732, indicating mixing of several sources, with signatures from both Jurassic marine carbonatic rocks and magmatic arc rocks (Gonzalez, 2022). Conversely, rivers from the Mapocho sub-catchment presented ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios between 0.70371–0.70417, indicating weathering of solely magmatic arc rocks. The difference in solute concentrations responds to the higher solubility of carbonatic rocks present in the Maipo sub-basin, despite their minor areal coverage (3.38%). The ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios remain constant throughout the studied period in both areas, revealing constant solute sources. Ge/Si ratios are indicative of weathering processes, and water sources and pathways (Kurtz et al., 2011). At the Mapocho sub-catchment, low Ge/Si between 0.40 - 1.64 µmol/mol are consistent with incongruent chemical weathering involving clay formation. At the Maipo catchment, Ge/Si ratios reach higher values, 0.68 - 11.73 µmol/mol, suggesting participation of other water Ge-rich sources, such as hydrothermal springs, or sulfide dissolution.

Stream discharge increases in the dry season due to snow/ice-melt at both Maipo and Mapocho sub-watersheds. However, at the Covarrubias stream, discharge is not dominated by snowmelt, and rather has a pluvial regime with streamflow maxima occurring in the wet winter season. Despite these differences, concentration-discharge relations of major cations (Ca, Mg, Na) show dilution patterns for all streams, with decreasing concentrations as streamflow increases (Godsey et al., 2019; Cartwright, 2020). Alkalinity and SO₄ values show high dispersion, suggesting minimum control of streamflow on their concentrations, and Cl indicates dilution for most streams except for the Covarrubias (shows chemostasis). On the other hand, Si and Ge show general dilution patterns, except at the Mapocho river, with a chemostatic behavior, and at the Covarrubias stream, which shows a chemodynamic (flushing) behavior, evidencing activation of other solute sources (mainly soil water or kaolinite dissolution) and further release of such solutes with increasing streamflow. Based on these observations, we can conclude that: (1) Sr isotopes reveal a constant source of solutes in both sub-catchments; (2) Ge/Si relations indicate chemical weathering involving incongruent dissolution at the Mapocho sub-catchment, and additional solute sources at the Maipo catchment; and (3) C-Q relations show that different hydrological regimes drive the temporal variability in solute concentrations, with most ions showing dilution patterns at peak streamflow.

As a synthesis, integrating Sr isotopes and Ge/Si ratios with concentration-discharge relations of major ions in catchments of contrasting lithologies, can improve the understanding of the role of the critical zone, as well as the climatic control, on solute generation and export. These combined geochemical proxies can also help monitoring temporal changes in water quality in seasonal Mediterranean mountain catchments, which is crucial in a climate change scenario.

Keywords: Weathering, Geochemical tracers, Sr isotopes, Ge/Si ratios, Concentration-discharge relations.

Financing: This project received funding from Fondecyt 3220318 (MMG); Fondecyt 1120656 and U-Inicia 006/20 (APF); Fondecyt 11190029 and U-Inicia 003/19 (MP).

Acknowledgments: We thank to the Departamento de Ingeniería y Suelos and Departamento de Geología (Universidad de Chile), to the Cornell University, and to the University of South Carolina for analytical facilities.

References:

- Cartwright, I. (2020). Concentration vs. streamflow (C-Q) relationships of major ions in south-eastern Australian rivers: Sources and fluxes of inorganic ions and nutrients. *Applied Geochemistry*, 120, 104680.
- Chorover, J., Derry, L., McDowell, W.H. (2017). Concentration-Discharge Relations in the Critical Zone: Implications for Resolving Critical Zone Structure, Function, and Evolution. *Water Resources Research*, 53, 8654–8659.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepulveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- Godsey, S.E., Hartmann, J., Kirchner, J.W. (2019). Catchment chemostasis revisited: Water quality responds differently to variations in weather and climate. *Hydrological processes*, 33(24), 3056-3069.
- González, J. (2022). Geoquímica y composición isotópica de estroncio de las formaciones sedimentarias mesozoicas de la cuenca del río Maipo. Memoria de título. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 96 pp.
- Kurtz, A.C., Lugolobi, F., Salvucci, G. (2011). Germanium-silicon ratios as a flow path tracer: Application to the Rio Icacos watershed. *Water Resources Research*, 47, W06516.

Seasonal and spatial variability in water stable isotopes and hydrochemical composition of a semiarid mountain river in NW Argentina

Marcos Simón Macchioli Grande¹, María Poca², Mariano Larrovere³⁻⁴, Gimena Uran³⁻⁴, Cecilia Echegoyen⁵, Esteban Jobbágy²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de San Luis - CONICET, Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada de San Luis, Av. Italia 1556, San Luis, Argentina

(3) CONICET – SEGEMAR – Universidad Nacional de La Rioja – Universidad Nacional de Catamarca – Provincia de La Rioja, Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica de La Rioja (CRILAR), Entre Ríos y Mendoza, Anillaco, La Rioja, Argentina

(4) Universidad Nacional de La Rioja, Instituto de Geología y Recursos Naturales, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Luis Vernet s/n, La Rioja, Argentina

(5) Universidad Nacional de Córdoba – CONICET, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), Av Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina

Rivers in semiarid mountains are the main water supply in Northwestern Argentina (Llanes et al., 2022). Understanding the variability in their isotopic and geochemical composition is important for assessment on water quality and management. This is crucial in this kind of environment, where water scarcity is rising due to climate change. We report isotopic and hydrochemical data of the Huaco river (Sierra de Velasco, at La Rioja province), which provides water to the capital city of the province. The catchment is 775 km² of size, and has a longitudinal shape with a NNW-oriented long axis. The geology is mainly composed of slightly peraluminous to peraluminous A-type granites of early carboniferous age (Grosse et al., 2009; Macchioli Grande et al., 2021). The climate is semiarid, with a wet season during the austral summer and a dry season during the austral winter. We collected samples on a seasonal basis between April 2021 (end of wet season) to October 2022 (end of dry season), from four sites along an altitudinal gradient, from 1500 to 1100 m. a.s.l. They are at the localities of Las Peñas (1500 m a.s.l.), Huaco (1240 m a.s.l.), Finca Vista Larga (1175 m a.s.l.), and Sanagasta (1110 m a.s.l.). Streamflow was also measured at each sampling site.

In general, stream Electrical Conductivity (EC) values range from 89 to 438 mg/L, and chloride varies between 1.7 and 143.0 ppm. $\delta^{18}\text{O}$ values range between -5.4 ‰ and -0.1 ‰, with a mean value of -4.3 ± 1.6 ‰ ($n = 26$), and $\delta^2\text{H}$ varies between -25 ‰ and -10 ‰, with a mean value of -21 ± 4 ‰ ($n = 26$). The d-excess ranges between -9 ‰ and 19 ‰ with a mean value of 13 ± 9 ‰. Interestingly, the averages from each sampling site reveal an increase in EC and chloride values with decreasing altitude. Streamflow decreased with increasing catchment size. The dual $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ plot reveals that water from the wet and dry periods of the same hydrological year plot closely together, and above the Global Meteoric Water Line except for samples from June 2021 (dry season). This suggests a uniform isotopic composition of stream waters at intra and inter-annual scale. Moreover, the Huaco river samples show similar isotopic signature than dry season samples from other Sierras Pampeanas streams (Poca et al., 2020).

Furthermore, the averages between the wet and dry seasons of EC, chloride, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ show no significant differences. To better understand the seasonal dynamics of this river, we measured major ions from samples from the end of the wet season of 2022 and end of dry season of the same year. Surface waters are diluted, and bicarbonate-mixed in composition. The results revealed no significant differences between both seasons, and an increment on total dissolved solids, EC and fluoride with increasing catchment size (downstream). These findings are in agreement with other semi-arid mountain catchments, which exhibit similar values throughout the year, despite inter-annual variability in isotopic composition of rainwater (Jin et al., 2012). The same pattern is observed for major ions hydrochemistry, in consistency with other rivers located in the same range, north from the study area (Uran et al., 2022). The uniform isotopic and chemical composition indicates that groundwater is the dominant source in these rivers, as reported for other semi arid mountain catchments (e.g. Hrachowitz et al., 2011; Mokua et al., 2020). In addition, increasing total dissolved solids and electrical conductivity, may indicate that surface waters undergo evaporative concentration downstream.

To sum up, isotopic and chemical composition of river waters from a semiarid mountain catchment suggests that groundwater is the dominant source of streamflow, remaining constant through the wet and dry seasons. Moreover, they exhibit evaporative concentration downstream, evidencing a climatic control on water chemistry. Nevertheless, further studies on mean transit time and water ages could shed light on the sources and fluxes of water within these seasonally dry catchments.

Keywords: Seasonal climate, Altitudinal gradient, Groundwater source, Evaporative concentration.

Financing: PICT-2018-03143 (FONCyT, Argentina) - M. PocaPIP-2712 (CONICET, Argentina) - M. PocaPUE-0325 (CONICET, Argentina) - M. LarrovereCICYT-00-00410/15 (Universidad Nacional de La Rioja, Argentina) - M. Larrovere.

Acknowledgments: The Leboran family is thanked for allowing sample collection in their dwellings. R. Páez and S. Ballesteros of GEALab are thanked for performing the analyses.

References:

- Grosse, P., Söllner, F., Báez, M.A., et al. (2009). Lower Carboniferous post-orogenic granites in central-eastern Sierra de Velasco, Sierras Pampeanas, Argentina: U–Pb monazite geochronology, geochemistry, and Sr–Nd isotopes. *International Journal of Earth Sciences* 98 (5), 1001-1025.
- Hrachowitz, M., Bohte, R., Mul, M.L., et al. (2011). On the value of combined event runoff and tracer analysis to improve understanding of catchment functioning in a data-scarce semi-arid area. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 2007-2024.
- Jin, L., Siegel, D.I., Lautz, L.K., et al. (2012). Identifying streamflow sources during spring snowmelt using water chemistry and isotopic composition in semi-arid mountain streams. *Journal of Hydrology* 470-471, 289-301.
- Llanes, A.L., Poca, M., Jiménez, Y.G., et al. (2022). ¿De dónde viene y a dónde va el agua de las ciudades? Base de datos integrada para 243 centros urbanos argentinos. *Ecología Austral* 32, 1133-1149.
- Macchioli Grande, M., Alasino, P., Dahlquist, J., et al. (2021). Thermal maturation of a complete magmatic plumbing system at the Sierra de Velasco, Northwestern Argentina. *Geological Magazine* 56, 537-554.
- Mokua, R.A., Glenday, J., Nel, J., et al. (2020). Combined use of stable isotopes and hydrochemical characteristics to determine streamflow sources in the Jonkershoek catchment, South Africa. *Isotopes in Environment and Health Studies* 56 (3), 238-259.
- Poca, M., Nosetto, M.D., Ballesteros, S., et al. (2020). Isotopic insights on continental water sources and transport in the mountains and plains of Southern South America. *Isotopes in Environment and Health Studies* 56 (5-6), 586-605.
- Uran, G.M., Pasquini, A.I., Giampaoli, V., et al. (2022). Hydrochemistry of mountain rivers in the Sierra de Velasco, La Rioja, Argentina: implications on dental fluorosis through statistical modeling. *Sustainable Water Resources Management* 8(5), 1-13.

Comparación del contenido de carbono en suelos de bosques nativos y plantaciones forestales en la Reserva Nacional Nonguén, Región del Biobío, Chile

Claudio Muñoz Rubilar¹, Pamela Castillo Lagos², Fernanda Álvarez Amado¹, Oscar Crovo Rondanelli³, Natividad Olmos de Aguilera², Felipe Aburto⁴

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Planificación Territorial y Sistemas Urbanos, Facultad de Ciencias Ambientales, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(3) Foresta Nativa Initiative, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(4) Texas A&M University, Soil and Crop Sciences Department, College of Agriculture and Life Sciences, 370 Olsen Blvd. College Station TX 77843, Texas, Estados Unidos

El carbono puede ser estudiado a través de dos ciclos interconectados pero distintos. El primero se relaciona con los seres vivos y un intercambio rápido de carbono, mientras que el segundo ocurre a largo plazo a través de procesos geológicos. Es esencial comprender tanto el ciclo orgánico como el inorgánico del carbono en suelos desarrollados sobre rocas graníticas. En estos suelos, el ciclo se centra principalmente en la materia orgánica, debido a la ausencia de carbonatos. La comprensión de este ciclo es crucial para evaluar la retención de carbono y su contribución global. Cualquier actividad humana que impacte estos suelos puede afectar significativamente el ciclo del carbono en este medio.

En el marco del cambio climático, es necesario comprender el impacto de la actividad humana en los recursos naturales y el ecosistema. En la zona centro-sur de Chile, la sustitución de bosques nativos por plantaciones de *Pinus radiata* es una preocupación, ya que puede tener efectos negativos en la diversidad biológica, la calidad del suelo y la retención de carbono. Por lo anterior, es esencial promover la conservación de los bosques nativos y adoptar prácticas sostenibles para mitigar los impactos ambientales y preservar la biodiversidad.

En el estudio del impacto de las plantaciones de *Pinus radiata* en comparación con los bosques nativos, los elementos nitrógeno, fósforo y carbono adquieren particular importancia debido a su papel clave en los ciclos biogeoquímicos y su uso intensivo en la actividad forestal. Estos elementos se utilizan como indicadores para evaluar la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales. Por lo tanto, comparar los niveles y ciclos de los diferentes elementos entre las plantaciones de pino radiata y bosques nativos permite obtener información valiosa sobre el impacto de la actividad forestal en el equilibrio y funcionamiento de los ecosistemas, así como en su capacidad para mantener la biodiversidad y el almacenamiento de carbono.

Algunos autores indican aumentos en el stock de carbono en el suelo posterior al reemplazo del bosque nativo por plantaciones forestales (Chen, 2005; Fialho & Zinn, 2012), mientras que investigaciones más recientes demuestran lo contrario (Guo & Gifford, 2002; Cao & Chen, 2017). Sin embargo, es importante considerar que el impacto específico del flujo de carbono en el suelo puede depender de múltiples variables y condiciones específicas de cada sitio, lo que dificulta realizar afirmaciones generales.

El área de estudio escogida para llevar a cabo esta investigación, se encuentra ubicada dentro de la Parque Nacional Nonguén, en la provincia de Concepción, región del Biobío. Esta zona forma parte de la Cordillera de la Costa y es uno de los 46 parques nacionales en el país. La elección de este lugar se debe a que se desarrolla bosque nativo adyacente a una plantación forestal de pino radiata y, por ello, ambas partes han sido expuestas a los mismos fenómenos atmosféricos, comparten la misma litología y las geomorfologías a gran escala son las mismas (considerando que el uso de suelo de todas formas afecta a las geoformas de carácter local).

Para realizar las mediciones de la cantidad de dióxido de carbono emitida desde el suelo, se establecieron de manera sistemática ocho sitios de muestreo. Dentro de cada sitio, se seleccionaron entre 6 y 10 puntos de medición, lo que resultó en un total de 112 puntos medidos. Con el fin de obtener una mejor representación de los datos recopilados, se realizaron mediciones en cada punto tanto por la mañana como por la tarde. Estas mediciones se llevaron a cabo bimensualmente desde marzo de 2022 hasta marzo de 2023, lo que implicó un total de 7 rondas de mediciones a lo largo del período de estudio. Esta estrategia de muestreo permitió obtener una cobertura amplia y representativa de los diferentes momentos del día y estaciones del año, proporcionando un registro más completo y robusto para el análisis. El dispositivo utilizado para la toma de datos es el sistema LI-8100 A, que consiste en una cámara colocada sobre el suelo que se conecta a un analizador de gas infrarrojo, permitiendo realizar la medición.

Crovo (2021) estipula que el promedio más alto de almacenamiento de carbono en el suelo se encontró en los bosques nativos con $202,22 \pm 82,77 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras que las plantaciones de pino tuvieron un promedio de $172,55 \pm 87,73 \text{ Mg ha}^{-1}$. Los resultados de la memoria de título en desarrollo presentan valores similares, a falta de concluir los análisis estadísticos.

Palabras Clave: Carbono, Impacto, Nativo, Plantaciones, Suelo.

Financiamiento: Financiamiento de Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y El Max Planck Institute for Biogeochemistry mediante el proyecto de cooperación internacional MPG 190022, "Forest Carbon Associative Research: Quantifying the effect of forest use intensification on soil carbon stabilization processes", dirigido por el Dr. Felipe Aburto. Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Concepción, VRID InvestigadorAS - N°2022000571, cuya investigadora responsable es la Dra. Fernanda Álvarez Amado. Adicionalmente se cuenta con el apoyo logístico del Departamento Ciencias de la Tierra, FCy y la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad de Concepción.

Agradecimientos: Se agradece al Max Planck Institute for Biogeochemistry y al ANID por el financiamiento y al Dr. Rafael Rubilar por facilitar el equipo. A Dilan y Camila por la ayuda en terreno y gabinete.

Referencias:

- Aburto, F., Crovo, O., Castillo P., Albornoz, F., Rubilar, R., Southard, R. (en preparación). Effects of native forest replacement to exotic plantations on forest dynamics and C, N and P total pools in south-central Chile.
- Cao, Y., & Chen, Y. (2017). Ecosystem C: N: P stoichiometry and carbon storage in plantations and a secondary forest on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 105, 125-132.
- Castillo, P., Aburto, F., Albornoz, F., Crovo, O., Southard, R. (en preparación). Soil mineralogical and physicochemical alterations after native forest replacement by exotic forest plantations in contrasting soil types.
- Chen, G. S., Yang, Y. S., Xie, J. S., Guo, J. F., Gao, R., Qian, W. (2005). Conversion of a natural broad-leaved evergreen forest into pure plantation forests in a subtropical area: effects on carbon storage. *Annals of forest science*, 62(7), 659-668.
- Crovo, O.; Aburto, F.; Albornoz, M., & Southard, R. 2021. Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations. *Catena*. Vol. 197. 1-13.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 8(4), 345-360. [doi:10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x](https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x).
- Davis, A. M. (Ed.). (2005). *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry*, Volume 1 (Vol. 1). Elsevier.
- Fialho, R. C., Zinn, Y. L. (2012). Changes in soil organic carbon under eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis. *Land Degradation & Development*, 25(5), 428-437.
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., Lambin, E.F. (2016). A plantation dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71-82.
- Nanuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and urban planning*. 107(1), 12-20.

Estimación de la influencia termal en los ríos de las cuencas volcánicas de los Andes del Sur (38° a 42°S)

Amanda Peña-Echeverría¹, Alida Pérez-Fodich¹, Daniele Tardani², Pascale Louvat³

(1) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Pl. Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins #611, Rancagua, Chile

(3) Université de Pau et des Pays de l'Adour, Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM), Technopôle Hélioparc 2 avenue P. Angot 64053, Pau, Francia

Los ríos que drenan regiones volcánicas son clave en el transporte global de solutos hacia el océano y en la absorción de CO₂ atmosférico a través de la meteorización de silicatos [1]. En zonas volcánicas activas, la desgasificación y los aportes hidrotermales pueden representar una fuente adicional de solutos y promover los procesos de meteorización a altas temperaturas [2,3]. Los arcos volcánicos continentales se caracterizan por la presencia de múltiples manifestaciones hidrotermales superficiales y tasas variables de desgasificación [4,5]. Este estudio se enfoca en los Andes del Sur, una de las provincias volcánicas más activas del mundo [6], que cuenta con más de 200 manifestaciones hidrotermales [7]. Con el objetivo de investigar el impacto de la actividad hidrotermal y volcánica en la composición química de los ríos de la zona, se tomaron muestras de agua de 22 ríos y 15 fuentes termales en diferentes cuencas volcánicas durante períodos de altas y bajas descargas. Además, se utilizó una combinación de trazadores geoquímicos para cuantificar el aporte hidrotermal de solutos. Los trazadores empleados corresponden a razones Ge/Si [8], isótopos de B ($\delta^{11}\text{B}$) [3], e isótopos de C ($\delta^{13}\text{C}$).

Los resultados obtenidos, permiten caracterizar los ríos como aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas. Además, la relación entre las concentraciones de Ca+Mg y Na indica que éstas provienen predominantemente de la meteorización de silicatos de rocas basálticas-andesíticas a andesíticas. Mediante el uso de los trazadores Ge/Si y la relación Cl/B vs $\delta^{11}\text{B}$, se logró identificar y cuantificar el aporte hidrotermal de solutos. Sólo en 4 ríos la influencia hidrotermal es mínima (<5%). Los isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y las concentraciones de carbono inorgánico disuelto (DIC) permiten identificar la presencia de desgasificación volcánica en 4 cuencas. A partir del método directo de asignación de solutos, junto con los trazadores Ge/Si y Cl/B es posible establecer que los ríos de la Zona Volcánica Sur reciben un flujo de cationes disueltos por actividad hidrotermal entre 0.23% y 97.3%, este rango es comparable al promedio global de ~40% de otras regiones volcánicas activas. Estas estimaciones muestran que la fracción de meteorización de silicatos por interacción agua-roca de alta temperatura en los Andes del Sur representa el 0.17% y el 81.4% del total de meteorización silicatos. Nuestros resultados subrayan la importancia de los aportes hidrotermales a los flujos de solutos en grandes regiones volcánicas.

Palabras Clave: Meteorización, Cuencas volcánicas, Sistemas Hidrotermales, Carbono.

Agradecimientos: Agradecer al Fondecyt 11200656 y la Beca ANID Magíster Nacional, al Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del CEGA, Chile y al Laboratorio G2E del Institut de Physique du Globe de Paris.

Referencias:

- [1] Gaillardet et al. (1999). Chem. Geo. 159, 3–30.
- [2] Dessert et al. (2009). GCA 73, 148–169.
- [3] Louvat et al. (2014), PEPS 10, 231–237.
- [4] Aiuppa et al. (2019), Sci Rep 9, 5442.
- [5] Mason et al. (2017), Science 357, 290–294.
- [6] Galetto et al. (2023), R. Geophysics, 10.1029/2022RG000783.
- [7] Wrage et al. (2017), Chem. Geo. 466, 545–561.
- [8] Gaspard et al. (2021), Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22, e2021GC009904.
- [9] Tardani et al. (2016), Geochimica et Cosmochimica Acta 184, 193–2.

Un modelo de transporte reactivo para el fraccionamiento de isótopos de Si y razones Ge/Si

Alida Pérez-Fodich¹, Nicole Fernández²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Santiago, Chile
 (2) Cornell University, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Ithaca, NY, USA

El germanio (Ge) y los isótopos estables de silicio (^{30}Si , ^{29}Si) son trazadores que al combinarlos tienen el potencial de ofrecer una visión única sobre la dinámica de la meteorización de los silicatos, pues se particionan durante la disolución de silicatos primarios y la precipitación de silicatos secundarios en la Zona Crítica. Estos trazadores se han utilizado en estudios de campo para identificar y cuantificar la interacción entre fluido-silicato a partir del fraccionamiento tanto en la carga disuelta de las corrientes de agua [Kurtz et al., 2011; Fernandez et al., 2022], como en los minerales de la interfase suelo-saprolito [Frings et al., 2021a,b]. También, algunos estudios experimentales han permitido investigar el fraccionamiento de $\delta^{30}\text{Si}$ cómo la partición de razones Ge/Si durante la precipitación de sílice a temperatura de ambiente [e.g., Fernandez et al., 2019, 2021]. Adicionalmente, se han utilizado modelos de transporte reactivo para investigar el comportamiento de Ge/Si y $\delta^{30}\text{Si}$ en dichas condiciones experimentales [Perez-Fodich & Derry, 2020; Fernandez et al., 2021]. Sin embargo, esta aplicación se ha limitado a la simulación de sistemas simplificados basados en un reactor cerrado y un solo par de minerales para la reacción disolución-precipitación. El objetivo de esta contribución es aprovechar estos avances recientes y extender las capacidades de los modelos de transporte reactivo aplicando los trazadores Ge/Si y $\delta^{30}\text{Si}$ a escala del pedón y cuenca. Para ello se genera un marco teórico que permite explorar los controles de primer orden en la partición de estos trazadores entre fluido y mineral considerando las siguientes variables: 1) litología (basalto v/s granito); 2) tasas de precipitación de minerales secundarios; 3) tiempos de residencia del fluido; 4) el efecto de la biota expresado como la respiración de suelo y la liberación de ácidos [Perez-Fodich & Derry, 2019]. Los objetivos principales de estas simulaciones son generar predicciones cuantitativas sobre la partición de Ge/Si y $\delta^{30}\text{Si}$ en la Zona Crítica, e ilustrar la viabilidad de la combinación de múltiples trazadores para investigar la interacción fluido-mineral en sistemas naturales. Estos esfuerzos permitirán informar sobre los controles de la dinámica de meteorización de silicatos a largo y corto plazo en la Zona Crítica.

Palabras Clave: Isótopos, Transporte reactivo, Modelamiento, Germanio.

Financiamiento: Fondecyt 11200656.

Referencias:

- Kurtz, A.C., et al. (2011). Germanium-silicon as a flow path tracer: Application to the Rio Icacos watershed. WRR 47, 16.
- Fernandez, N.M., et al. (2022). Resiliency of Silica Export Signatures When Low Order Streams Are Subject to Storm Events. JGR-Biogeosci. 127.
- Fernandez, N.M., et al. (2021). A first look at Ge/Si partitioning during amorphous silica precipitation: Implications for Ge/Si as a tracer of fluid-silicate interactions. GCA 297, 158-178.
- Fernandez, N.M., et al. (2019). Silicon isotopic re-equilibration during amorphous silica precipitation and implications for isotopic signatures in geochemical proxies. GCA 262, 104-127.
- Frings, P.J., et al. (2021a). Interpreting silicon isotopes in the Critical Zone. AJS 321, 1164-1203.
- Frings, P.J., et al. (2021b) Quantifying biotic and abiotic Si fluxes in the Critical Zone with Ge/Si ratios along a gradient of erosion rates. AJS 321, 1204-1245.
- Perez-Fodich, A., & Derry, L.A. (2019.) Organic acids and high soil CO₂ drive intense chemical weathering of Hawaiian basalts: Insights from reactive transport models. GCA 249, 173-198.
- Perez-Fodich, A., & Derry, L.A. (2020.) A model for germanium-silicon equilibrium fractionation in kaolinite. GCA 288, 199-213.

What happens when weathering reduces the permeability of rocks?

Alida Pérez-Fodich¹, Louis Derry²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Santiago, Chile

(2) Cornell University, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Ithaca, NY, USA

More than 10 years of continuous development of Critical Zone Science has taught us that pedogenesis and biogeochemical alteration of parent rocks in hydrologic basins can significantly transform water pathways and catchment structure. This is the aim to state that weathering reactions can significantly alter the structure and physical properties of a rock. Particularly weathering induces changes in porosity, and thus in the permeability of rocks. Often these changes create new porosity and water pathways, because weathering removes mass by leaching elements from a rock, but also because it causes strain reactions during secondary mineral precipitation that drive fracturing. These processes can then alter the structure of the soil and saprolite at a watershed scale, which in turn will change the water partitioning budgets, often increasing water-rock ratios in the saprolite. Thus, what happens when weathering reduces the permeability of rocks?

We have investigated the effect of weathering on permeability and runoff-to-groundwater ratios in the Island of Hawaii. The younger and drier volcanoes in the Island show initial high porosity and permeability, as most of the rainfall infiltrates directly to the groundwater system, resulting in limited surface runoff. On the other hand, the older and wetter areas are characterized by incised landscapes with increasing runoff and perennial discharge. We hypothesize that this phenomenon is a result of the time-integrated weathering history, which can change runoff-to-groundwater ratios by decreasing the initial permeability of the basaltic rocks.

We have modeled hydrodynamic properties at the watershed scale in perennial streams as a function of the time-integrated weathering history. We also studied the recession response in younger ephemeral streams as a function of lava flow age. We show in perennial streams that hydraulic conductivity – and thus, permeability – is 3 to 6 orders of magnitude lower on the more weathered (older or wetter) catchments when compared to the less weathered catchments. Stream recession in ephemeral streams increases by one order of magnitude as the portion of lava flows older than 5,000 years increases in young catchments. Thus, the weathering induced reduction in permeability appears to control the change in the runoff-to-groundwater partitioning budget in this volcanic landscape at millennial timescales. Our results underline the effect of weathering reactions on changing the structure and physical properties of rocks, and their importance for the evolution of the architecture of the Critical Zone.

Keywords: Hidrología, Zona crítica, Meteorización, Permeabilidad, Suelos volcánicos.

Financing: Make our planet great again short-stay grant. Fondecyt 11200656.

Acknowledgments: USGS National Water Information System.

Sensing Energy and Matter fluxes in a biota dominated Patagonian landscape through environmental seismology – Introducing the Pumalín Critical Zone Observatory

Christian Mohr¹, Michael Dietze²⁻³, **Violeta Tolorza⁴**, Erwin González⁵, Benjamín Sotomayor⁶, Andrés Iroumé⁷, Sten Gilfert¹, Frieder Tautz¹

(1) Institute of Environmental Sciences and Geography, University of Potsdam, Potsdam, 14482, Germany

(2) Georg-August-University, Department of Physical Geography, Germany

(3) GFZ Potsdam, Section 4.6 Geomorphology, Germany

(4) Universidad de la Frontera, Temuco, Chile

(5) Pumalín Douglas Tompkins National Park, Corporación Nacional Forestal (CONAF), Amarillo, Chile

(6) Dron Aerogeomática SpA, Spatial Data and Analysis in Aysén, Chile

(7) Instituto de Conservación, Biodiversidad y Territorio, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

The Coastal Temperate Rainforests (CTRs) found in Chilean Patagonia possess significant ecological value and play a crucial role in biogeochemical cycling and surface processes. These forests are exceptionally carbon-rich, making them one of the most important biomes for carbon storage on Earth. They are home to frequent and diverse natural disturbances, such as volcanic eruptions, windstorms, earthquakes, and landslides – commonly resulting into (near-)surface processes. Therefore, Patagonian CTRs provide valuable insights into the interactions between ecogeomorphology, forests, and matter and energy fluxes. In 2005, the Earth science community launched the Critical Zone Exploration Network to promote interdisciplinary research with the help of critical zone observatories (CZO). CZOs are sites aimed to measure the fluxes of solutes, water, energy, gas, and sediments in the CZ. Despite their unique biogeographic, geochemical, and ecological significance, Patagonian CTRs are still underrepresented in the current list of CZO. To address this gap, we here introduce the Pumalín CZO, the first of its kind, situated in the Pumalín National Park in northern Chilean Patagonia. Our research at Pumalín CZO focuses on four core themes, employing various cutting-edge techniques. Our research themes include understanding (1) the functioning of carbon sinks, (2) the landscape evolution driven by biota, (3) the fluxes of water, bio-geology, and energy, and (4) comprehending disturbance regimes.

For the design of our instrumentation, we follow the exposure concept. That is, the long-term likelihood of disturbance within a given area. We look for monitoring disturbance exposure gradients to collect the required metrics with a sustainable set of sensors. Our methods include: (1) Environmental Seismology, which allows the continuous monitoring of location, timing and magnitude of the (near-)surface processes, while being minimal-invasive at the same time; (2) Predicting forest biomass and carbon stocks, combining field data of diameter at breast height (DBH) and respective tree-height with airborne LIDAR-based tree metrics; and (3) hydrometeorological stations recording air temperature, air pressure, relative air moisture, wind speed and direction, precipitation (intensity and amount) and soil moisture in three distinct depths at temporal resolutions of 1 and 10 minutes.

Our research highlights the importance of an integrated approach, i.e., ‘one physical system’, as proposed by Richter and Billings (2015), and accounting for the recent advances in pushing nature conservation along the Chilean coast.

Keywords: Critical Zone, Patagonia, Ecogeomorphology, Temperate Rainforest

Financing: DFG project 493703771, FONDECYT project 11190864, VRIP20P001, FONDECYT project 1200079.

Acknowledgments: We thank the entire CONAF crew of Pumalín NP, as well as the Rewilding Chile foundation conserving this marvelous forest, for permitting our research, and providing access to our study sites.

Referencias:

- Richter, D. and Billings, S. A.: ‘One physical system’: Tansley’s ecosystem as Earth’s critical zone. *New Phytol.* 206 (3), 900– 912. [DOI:10.1111/nph.13338](https://doi.org/10.1111/nph.13338), 2015.

Rol de los sulfuros y frentes de reacción en la meteorización química de la Zona Crítica, sector Santa Gracia, Región de Coquimbo

Roberto Ulloa B.¹, Pablo Sánchez A.¹, Alida Pérez F.², Gerdhard Jessen R.¹

(1) Universidad Austral de Chile, Ciencias de la Tierra, Ciencias, Independencia 631, Valdivia, Los Ríos, Valdivia, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Libertador General Bernardo O'Higgins 1058 Santiago, Región Metropolitana, Chile, Santiago, Chile

La Zona Crítica, aunque definida de manera arbitraria, desempeña un importante rol en la comprensión de los procesos terrestres superficiales y su impacto en la vida. Aquí, tiene lugar la meteorización (física, química y biológica) de las rocas frescas que genera la formación de suelos y sedimentos. Las investigaciones en torno a la Zona Crítica abarcan diferentes contextos geológicos, con observatorios a nivel mundial que se extiende desde litologías de tipo calizas hasta rocas volcánicas. Puntualmente, estudiando el proceso de meteorización química, se ha evaluado cómo la difusión de gases atmosféricos (dióxido de carbono y oxígeno) cumplen un papel preponderante modulando la velocidad y profundidad en la que ocurre la meteorización en la ZC. Por otro lado, se ha planteado en ambientes de lutitas ricas en pirita que la oxidación de estos sulfuros podría ser una fuente de acidez, actuando como un catalizador en la meteorización química. El objetivo de esta investigación se centra en la comprensión y cuantificación del rol que desempeñan los procesos de lixiviación y/u oxidación de los sulfuros a lo largo de los frentes de meteorización en entornos intrusivos. La investigación está en el marco del proyecto 11 (Fase 2) de EarthShape: "Geoquímica de meteorización, frentes de reacción en regolitos y su mecanismo de avance". El área de estudio se centra en la Cordillera de la Costa de Chile a la latitud ~30°S, en la localidad de Santa Gracia, donde hay un clima semiárido, precipitación media anual de 87 mm/años, temperatura media anual de 16.1°C, y vegetación xerófila dominante. Las principales rocas son de edad jurásica – cretácica, principalmente de composición granítica y rocas volcánicas andesíticas.

Para identificar la secuencia paragenética, la profundidad del frente de meteorización y posibles zonaciones a escala de grano mineral, se utilizó microscopía de luz transmitida, luz reflejada y microscopía electrónica de barrido (SEM) en láminas delgadas a diferentes profundidades de un testigo de roca ~87 m de profundidad obtenido en la zona de estudio. Las observaciones mineralógicas, texturales y relaciones de corte y reemplazo en las láminas estudiadas, permitieron establecer una secuencia paragenética, donde se interpreta eventos magmáticos e hidrotermales para la asociación de Mag – Ccp – Py – Anf – Kfs – Plag – Bt. Asimismo, se identifica un evento supérgeno para la asociación Cv – Cc – Bn. Los resultados de microscopía a escala de sondaje indican un frente de reacción profundo asociado a calcopirita (55 – 65 m), y frentes de reacción de silicatos más someros, uno de plagioclasa (20 – 40 m) y feldespato potásico (10 – 30 m). Igualmente, los óxidos de Fe aparecen en todo el sondaje, teniendo variaciones mineralógicas en profundidad, con predominancia de magnetita (>60m), y en superficie con predominancia de hematita (<40 m). En cuanto a escala de grano, no se observan zonaciones químicas ni mineralógicas claras; sin embargo, hay cambios composicionales al comparar la estequiometría de sulfuros y óxidos de Fe con los datos otorgados por los análisis puntuales en SEM. Esto puede dar indicio de oxidación mineral, aunque puede ocurrir una limitación con la detección de elementos livianos, como el oxígeno, por este método. Estos resultados pueden indicar que la oxidación ocurre predominantemente a través de advección hasta los 55 – 65 m (frente de reacción de calcopirita), mientras que, por debajo de esta profundidad, procesos de difusión de oxígeno son dominantes. La difusión puede ser concordante con bordes de crecimiento mineral (e.g. goetita en calcopirita) observados por debajo del frente de reacción de calcopirita, aunque estos pueden haberse formado durante los procesos magmático – hidrotermal. Complementariamente se utilizó el código de transporte químico reactivo CrunchFlow para simular la influencia de la pirita en los principales parámetros que controlan el frente de meteorización. Para esto se utilizó una simplificación considerando dos casos extremos: la meteorización química sin pirita y con pirita. Los resultados de modelación numérica indican una profundización de los frentes de reacción de los silicatos en influencia de pirita, teniendo el frente de reacción de pirita como el más profundo (>60m).

A pesar de la influencia ejercida por fenómenos como el levantamiento tectónico y los patrones climáticos en la regulación de la profundidad de la Zona Crítica, nuestros resultados sugieren que los sulfuros cumplen un rol significativo en la profundización de los frentes de reacción. Observamos una mayor eficacia en la meteorización química, lo que, a su vez, favorecería la mejora en la difusividad de gases atmosféricos hacia las zonas más profundas, resultando en Zonas Críticas de mayor envergadura.

Palabras Clave: Zona Crítica, Meteorización química, Sulfuros, Frentes de reacción, Modelo de transporte de reactivos.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto N° 11 de EarthShape, junto con apoyo parcial recibido por el proyecto Fondecyt 1201219.

Agradecimientos: Al Dr. Friedhelm Von Blanckenburg y su equipo con quienes trabajé en terreno, y mis profesores guías Dr. Pablo Sánchez, Dra. Alida Pérez y Dr. Gerdhard Jessen en el desarrollo del proyecto de tesis.

Análisis mineralógico, físico y químico del suelo – roca en el área de Pichibelco – Cauquenes y sus aplicaciones hacia el mapeo regional escala 1:100.000

Paula Zuloaga Contreras¹, Natalia Astudillo Leyton², Camilo Sánchez Yáñez¹⁻³

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Santa María 0104, Santiago, Chile

(3) Cobrizo Geología Ambiental, Santiago, Chile

La creación de mapas geológicos se basa en el reconocimiento litológico según los afloramientos presentes en las localidades en estudio, sin embargo la exposición de las rocas puede verse dificultada por la cantidad de suelo y vegetación que se encuentra, como por ejemplo en el sur de Chile. Esta situación presenta diversas complicaciones producto del desconocimiento del material parental que genera los suelos, por lo que, suelen ser clasificados como indiferenciado, conduciendo a errores en el desarrollo de mapeos geológicos. Es por esto que, en base a la estrecha relación mineralógica, física y geoquímica entre la fracción tamaño arena a grava de los suelos generados *in situ*, este trabajo plantea de forma preliminar, la creación de una metodología que relacione la característica de los suelos *in situ* con el protolito que lo genera una disminución en la incertidumbre del mapeo geológico a escala 1:100.000.

Como zona de estudio, se analizaron muestras de suelo y protolitos encontrados en la zona de Pichibelco – Cauquenes, región del Maule. En donde se llevaron a cabo análisis físicos, identificación de la petrografía macroscópica, microscopía óptica, análisis de pH y metodologías analíticas como difracción de rayos X (DRX) y espectrometría de masas de plasma (ICP-MS).

Se reconoció la mineralogía de los horizontes mejor preservados, lo que permitió la división de la litología de los protolitos, reconociendo de este modo los suelos de origen ígneo intrusivo, extrusivo, metamórfico y sedimentarios, además de coincidir que los suelos de cada división constaban de niveles de pH neutro y estados de meteorización moderado, además de tener madurez textural intermedia, respecto a la granulometría de los sedimentos de origen terrígeno.

Los resultados mineralógicos y químicos indicaron que las muestras corresponden principalmente al Basamento Metamórfico Oriental y Occidental, Basamento Intrusivo Paleozoico y Mesozoico, Volcanismo explosivo del Pleistoceno y Rocas sedimentarias del Cuaternario. A pesar de que la mayoría de las muestras corresponden a las formaciones que se les había propuesto, se identificaron muestras a través de la metodología empleada, que se encontraban mal designadas por parte de su protolito y que alterarían los límites de la carta/mapa geológico en proceso.

Por lo anterior es importante la identificación de los fragmentos que ayudarán al reconocimiento a través de la observación y descripción de los clastos, ya que solamente con la descripción mineralógica y la difracción de rayos X es posible identificar el material parental. En donde la mineralogía y geoquímica es dependiente del material parental, esta determinará en gran parte la mineralogía secundaria, y algunos de los minerales de arcillas pueden influir en las condiciones fisicoquímicas de estos. Con el reconocimiento mineralógico y textural, se muestran evidentes similitudes mineralógicas en la gran mayoría de las muestras. Además, se plantea que la generación de suelos *in situ* se ve afectada por sedimentos fluvio-aluviales y factores antrópicos, lo que se evidencia en los pequeños sedimentos de origen terrígeno que se encuentran en las muestras, ya que, al no tratarse de un sistema cerrado, se ve afectado por factores externos que pueden alterar los resultados y donde si se encontrara en esta situación la metodología no es válida.

Palabras Clave: Suelo, Geoquímica, Mineralogía.

Agradecimientos: Agradezco a Eugenia Fonseca quien hizo los análisis de DRX y Juan Bustamante junto a su equipo por los análisis de ICP-MS en los laboratorios de SERNAGEOMIN.

Actualización del modelo de resistividad eléctrica del volcán Lastarria (Andes Centrales), basada en mediciones geofísicas en zonas de desgasificación

Daniel Díaz¹⁻³, Bárbara Blanco Arrué²⁻⁴, Till Vondenhoff², Jaime Roas², Katarzyna Slezak³, Pritam Yogeshwar²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(2) University of Cologne, Institute of Geophysics and Meteorology, Pohlistr. 3, Cologne, Germany

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico, Ckelar - Volcanes, Avenida Angamos 610, Antofagasta, Chile

(4) Leibniz Institute for Applied Geophysics, Geoelectrics and Electromagnetics, Stilleweg 2, 30655, Hannover, Germany

El volcán Lastarria se emplaza en una zona que llamó la atención de la comunidad internacional hace algunas décadas, al evidenciarse un fuerte alzamiento, entre el volcán Lastarria y el Cordón del Azufre (zona llamada Lazufre en la literatura), mediante mediciones de InSAR realizadas a finales de los 1990 y comienzos de los 2000 (Pritchard y Simons, 2004), lo que aumentó considerablemente el estudio de esta zona de los Andes Centrales.

Este volcán se caracteriza por una intensa y persistente desgasificación (Tamburello et al., 2014), con composiciones químicas que han mostrado variaciones al ser observadas durante 2006-2009 por Aguilera et al. (2012) y ligadas en su origen a un sistema hidrotermal, mientras Tamburello et al. (2014) identifica muestras de origen claramente magmático, con mediciones realizadas durante el 2012.

Los métodos electromagnéticos (EM) en geofísica aplicada han sido ampliamente utilizados desde la década de los 60's. Estos se pueden dividir en pasivos, que emplean campos naturales como fuente, o activos, en los que se requiere una fuente controlada, comúnmente llamada transmisor. También, se pueden categorizar en aquellos que registran datos en el dominio del tiempo y frecuencia. Sus aplicaciones van desde la exploración somera hasta varios kilómetros de profundidad, siendo la combinación de diversos métodos EM una poderosa herramienta para la obtención de modelos de resistividad precisos y robustos. Entre sus principales ventajas, y su aplicación en la exploración geotérmica, se destaca la capacidad de resolver conductores eléctricos en el subsuelo.

Modelos geofísicos se han obtenido para este volcán, interpretando sistemas magmáticos hacia el sur del Lastarria, entre 3 y 6 km de profundidad mediante magnetotelúrica (Díaz et al. 2015) y tomografías sísmicas (Spica et al. 2015). Ambos trabajos identifican también un sistema hidrotermal desarrollado en el primer kilómetro de profundidad, identificando bajas velocidades de onda sísmica y altas conductividades eléctricas en todo el entorno del volcán Lastarria, sin embargo, se desconoce una distribución de resistividad eléctrica a escala local que precise las zonas de desgasificación en torno al volcán.

En el marco del Instituto Milenio Ckelar-volcanes, en abril de 2023 se realizó una campaña de mediciones aplicando métodos EM como el transiente electromagnético (TEM) e inducción electromagnética (CMD), para investigar en detalle uno de los centros de desgasificación del volcán Lastarria. Con el fin de obtener un modelo de resistividad local con una mayor resolución de la estructura y geometría de este sistema de desgasificación. Junto a esto, se busca mejorar la resolución superficial de modelos obtenidos con mediciones de magnetotelúrica en el área de estudio (Díaz et al. 2015), incorporando de mejor manera la topografía de la zona. Debido a su alto uso en recursos computacionales, las inversiones se ejecutan en el servidor del Instituto de Geofísica y Meteorología de la Universidad de Colonia utilizando CPU AMD EPYC 7763 con 64 núcleos cada una y 4TB de RAM.

Resultados preliminares de TEM detectan un estrato conductor somero consistente en todas las estaciones medidas. Dichos resultados serán contrastados con el mapeo de conductividad, así como también sus respectivas interpretaciones en base a la geología del sector, contribuyendo en la comprensión de procesos magmáticos-hidrotermales del volcán Lastarria.

Palabras Clave: Geofísica, Volcanes, Resistividad eléctrica.

Financiamiento: Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar volcanes.

Agradecimientos: Al Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar volcanes (ICN2021_038), que financió la adquisición de datos de transiente electromagnético en terreno.

Referencias:

- Aguilera, F., Tassi, F., Darrah, T., Moune, S., & Vaselli, O. (2012). Geochemical model of a magmatic-hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile. *Bulletin of volcanology*, 74, 119-134.
- Díaz, D., Heise, W., & Zamudio, F. (2015). Three-dimensional resistivity image of the magmatic system beneath Lastarria volcano and evidence for magmatic intrusion in the back arc (northern Chile). *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5212-5218.
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(2).
- Spica, Z., Legrand, D., Iglesias, A., Walter, T. R., Heimann, S., Dahm, T., ... & Pardo, M. (2015). Hydrothermal and magmatic reservoirs at Lazufre volcanic area, revealed by a high-resolution seismic noise tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 27-38.
- Tamburello, G., Hansteen, T. H., Bredemeyer, S., Aiuppa, A., & Tassi, F. (2014). Gas emissions from five volcanoes in northern Chile and implications for the volatiles budget of the Central Volcanic Zone. *Geophysical Research Letters*, 41(14), 4961-4969.

Una década de variaciones en el b-value de la sismicidad volcano-tectónica como un indicador del estado dinámico de un volcán: el caso del volcán Copahue, Andes del Sur

Cristian Farías Vega¹, Jonathan Lazo², Daniel A. Basualto Alarcón³

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 02959, Temuco, Chile

(2) Universidad de la Frontera, Departamento de Ciencias Físicas, Facultad de Ingeniería, Candelaria 291-411, Temuco, Chile

(3) Universidad de la Frontera, Dirección de Investigación, CIVUR-39°, Centro Interactivo Vulcanológico de la Araucanía, Facultad de Ingeniería, Lincoyán 77, Pucón, Chile

Los volcanes pueden entrar en períodos de crisis, que después pueden terminar en una erupción, con poca o ninguna advertencia. Estos períodos de crisis son normalmente producidos debido a la dinámica interna del volcán, pero también pueden ser gatilladas por terremotos externos. Para detectarlos de manera temprana, se vuelve crucial entender la dinámica de las diferentes estructuras (como sistemas de falla) del volcán, ya que estas pueden actuar como caminos para que el magma se movilice, y además pueden desestabilizar al sistema. Aquí estudiamos la sismicidad del volcán Copahue, que está localizado en un complejo sistema de fallas, y fue fuertemente afectado por el terremoto del Maule del 2010 (Mw 8,8). Nos enfocamos en el seguimiento de las variaciones temporales del b-value de la Ley de Gutenberg-Richter, que el volcán cumple durante el período 2012-2022. Durante este período el volcán tuvo una serie de crisis, que llevaron a siete fases eruptivas. Nuestros resultados muestran que el sistema presenta señales previo a una fase de crisis, con semanas a meses de anticipación (esto es, antes de que haya un cambio de alerta en el sistema). Los cambios en el b-value que parecen ser más relevantes aparecen en la sismicidad que está ubicada en el borde Noreste de la caldera Cavihue, y consisten mayormente en caídas relativamente súbitas en el valor de b en esta zona, que son seguidos después por cambios en otros indicadores críticos del volcán. También apreciamos variaciones súbitas e importantes en el b-value como respuesta al terremoto de Illapel del 2015 (Mw 8,3). Todo esto sugiere que el seguimiento de las variaciones temporales de b en las estructuras relevantes para la movilización de fluidos de un volcán puede ser una herramienta útil para anticipar cambios en la dinámica interna de un sistema volcánico, especialmente cuando este está sometido a un fuerte control estructural. Nuestros resultados también sugieren que la influencia del terremoto del Maule del 2010 (Mw 8,8) duró varios años, contribuyendo a desestabilizaciones del volcán durante la mayor parte de una década, lo que parece haber cambiado en el año 2021, indicando posiblemente un límite en la influencia del terremoto en el sistema.

Palabras Clave: Terremoto, Volcán, Copahue, Maule, B-value.

Financiamiento: Este trabajo contó con el apoyo del proyecto Fondecyt Iniciación 11230715.

The role of volatiles in magma chamber dynamics: a case study from the 1932 eruption of Quizapu Volcano (Chile)

Nicolás Mendoza¹, Claudia Cannatelli², Álvaro Amigo³, Ángelo Castruccio¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) University of Alaska Anchorage, Department of Geological Sciences, Alaska, USA

(3) SERNAGEOMIN, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Santiago, Chile

Quizapu volcano belongs to the Descabezados Volcanic Group, which is part of the northern segment of the Southern Volcanic Zone of the Andes (SVZ) in Chile. The volcanic complex is characterized by "twin" eruptions because they share similar chemical composition (dacites and basaltic andesites) and a volume of 5 km³ of erupted products, but at the same time these events exhibit contrasting eruptive styles. The first eruption in 1846-47 was clearly effusive, while the second in 1932 was completely explosive (Hildreth & Drake, 1992, Ruprecht et al., 2012).

We determined the pre-eruptive conditions of the 1932 eruption by using Melt Inclusions (MIs) hosted in phenocrysts from tephra deposits. We collected tephra samples from the entire eruptive column, which included the initial (Initial Scoria - andesite), middle (Lower and Upper Dacite) and final stages (Final Scoria - andesite) of the eruption. Chemical compositions were determined by Electron microprobe analysis (EMPA), JEOL JXA 890. Dacitic samples contain plagioclase, biotite, hornblende and pyroxene, with plagioclase compositions ranging from labradorite to oligoclase. Andesitic samples contain olivine (Fo₇₁₋₈₁), pyroxene and plagioclase with compositions ranging from labradorite to andesine. We selected homogeneous ($\pm$ bubbles) olivine- and plagioclase-hosted MIs that were in equilibrium with the host crystal, providing certainty about the composition of the parental magma.

We provide the first direct measurements of H₂O and CO₂ in the Quizapu products from the 1932 eruption by Secondary-ion mass spectrometry (SIMS), Cameca IMS 7f-Geo. H₂O concentrations range from 4.6 wt% for the dacite, 0.58 wt% for the Final Scoria, and up to 1 wt % for Initial Scoria. The average CO₂ concentrations range from 136 ppm for the dacite, 92 ppm for the Final Scoria, and up to 295 ppm for the Initial Scoria. CO₂ contents in bubble-bearing MIs could not be quantified by Raman Spectroscopy (Typ Horiba Jobin-Yvon Labram HR800UV) due to fluorescence of the samples, therefore our CO₂ contents should be considered to be minimum values. Volatile data results for the main dacitic magmatic chamber suggest that the magma degasses as a closed system with little to no exsolved volatile phases. One of the studied dacite crystals had a H₂O content of up to 7.75 wt.%, which suggests there was either a heterogeneous distribution of volatiles in the magma chamber or mixing of a volatile-rich magma batch.

The average pre-eruptive temperature and pressure determined for the dacitic reservoir is 873 $\pm$ 39°C and 1.35 - 1.9 kbar, respectively. These conditions were calculated considering equilibrium with the host mineral and CO₂ - H₂O vapor pressure curves. These values confirm the existence of a shallow dacitic reservoir as the source of the 1932 eruption.

Palabras Clave: H₂O, Quizapu, Volátiles, CO₂.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) proyecto FONDAP-CONICYT #15090013 y parcialmente por el Programa de Estadías Cortas de Investigación Convocatoria 2019 del Departamento de Postgrado y Postítulo, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, Universidad de Chile.

Referencias:

- Hildreth, W. and Drake, R. (1992). "Volcán Quizapu, Chilean Andes." *Bulletin of Volcanology* 54(2): 93-125.
- Ruprecht, P., Bergantz, G. W., Cooper, K. M. & Hildreth, W. (2012). The crustal magma storage system of Volcan Quizapu, Chile, and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology* 53, 801-840.
- SIMS standard: H₂O by KFT, CO₂ by FTIR (Shiskina et al 2010) except 519-4-1 (Hauri et al 2002 *Chem Geol* 183; sample from Stolper).

Magmatic sulfur speciation and excess degassing at Villarrica volcano, Southern Volcanic Zone

Philippe Robidoux¹, Susanna Layana²⁻³, Felipe Aguilera²⁻³, Mauricio Rivera²⁻³, Nahun Irrarrázabal²⁻³, Marco Liuzzo⁴

(1) Universidad de Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Chile

(4) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa 153, 90146, Palermo, Italy

Introduction

Villarrica volcano, located at "39°24'S and 71°55'W" is host to a degassing active lava lake [1], but is known for carbon budget fluctuations between and during phases of small scale as highly explosive eruptions at central crater [2]. This concern as volcanic hazard and the management of gas monitoring has not been explored yet from the point of view of sulfur species (SO₂, H₂S) despite long term SO₂ gas surveys and rich petrological background on Villarrica magma. In these circumstances, the research proposes a gas monitoring-combined petrological survey to locally evaluate sulfur excess at the central vent of Villarrica, because evaluation of the magma-gas differentiation mechanisms causing the excess degassing is necessary to understand eruptive processes in the volcanic system [3].

Methodology

The magma reservoir sulfur budget is investigated through new measurements of the quiescent volcanic plume and melt inclusion (MI) data from eruptive products, taking into consideration decadal collections of monitoring gas surveys processed during eruptive as quiescent degassing phases from Villarrica central vent. The literature production of MI-hosted sulfur content from Villarrica and SVZ stratovolcano is a rich source of quantified information (EMPA, SIMS) in comparison to other dominant gas species (H₂O-CO₂). For this reason, sulfur represents a well-established control on occurrence and style of eruptions [3]. A collection of new MIs and olivine-glass rim sulfur volatile is thus presented here at Villarrica, considering monitored 2015 paroxysmal eruption in addition to recent explosive eruptions (Chaimilla tephra) to scale sulfur contents with petrological method [4]. The geochemistry of MI trapped in olivine is measured for major oxide content by Electron Microprobe Analysis (EMPA) and sulfur elements by Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS). Mass of quiescent volcanic SO₂ is measured considering quiescent degassing periods with new survey from UV-Camera performed during December 2022 campaign concurrently to automatized Multigas data from summit crater to obtain plume gas ratios for sulfur speciation derived from gas ratio from each sensor (SO₂, H₂S, CO₂, H₂O).

Results

Quantification of excess degassing covering different situations from the Villarrica eruptive history is applied by measuring concentrations (in mass fraction) of the volatile component in a pre-eruptive melt (melt inclusion) and in a post-eruptive melt (matrix glass) [4,5], disposing following ppm sulfur excess content ranges respectively at 2015 paroxysm, Chaimilla Tephra; ~169, (747-1216). The mass of volcanic SO₂ is estimated from literature data and a survey using a UV-Camera during quiescent degassing periods averaging ~67 T/d. The integrated Multigas ratios for the plume occurred during wind speed (2-11 m/s), gas temperature of 7.9-11.7°C (humidity sensor "Rh" = 44.9-49.7%) as direction change (W to SSW), considering the following ranges of ratios for SO₂/H₂S (2.1-11.5), CO₂/SO₂ (>203) H₂O/CO₂ (0.8-3.7), H₂O/SO₂ (151-243), H₂O/H₂S (1,653-7,543); (R²=0.71-0.91).

Conclusion

The new MI data indicate that melt degassed strongly during explosive eruptions from Chaimilla events, while the paroxysmal 2015 eruption is already hosting degassed MIs, so record lower sulfur lost by igneous mechanisms and melt differentiation processes. The S speciation provided with the Multigas survey shows evidence of SO₂ dominance over H₂S, therefore, closer to authentic weakly oxidized magmatic vapor that is produced by the actual lava lake. According to eruptive mass rates in literature data [6,7,8] and actual excess S contents (SO₂), we determine paroxysmal eruption from 2015 (1.66·10⁹ - 2.13·10⁹ tons) should exceed cumulative annual quiescent SO₂ budgets (~24,000 tons); this is several orders of magnitude superior depending on daily flux variations. In comparison, the sub-plinian-vulcanian eruption Chaimilla produced magmatic SO₂ in the order of 2.58·10¹¹ - 3.84·10¹¹ tons (unknown atmospheric SO₂). This research concludes that the amount of excess SO₂ from the 2015 eruptive periods would correspond to an eruptive flux of 1.77·10⁶ - 2.28·10⁶ tons/s, while typical Villarrica quiescent degassing fluxes if maintained constant, could allow the gas loss to restrict conduit overpressure.

Palabras Clave: Excess degassing, Sulfur speciation, Villarrica volcano, Eruptive style, Gas plume

Financiamiento: Fondecyt Iniciación N 11190846 de Dr. Philippe Robidoux.

Referencias:

- [1] Shinohara and Witter, 2005
- [2] Aiuppa et al., 2017
- [3] Andres et al., 19914.
- [4] Devine et al., 1984
- [5] Shinohara, 2008
- [6] Romero et al., 2018
- [7] Costantini et al., 2011
- [8] Pioli et al., 2015.

The Submerged Prolongation of the Land Mass of Islands Atop Hot-Spot Seamount Chains: A Replicable Scientific Rationale in Compliance with U.N. Law of the Sea's Article 76

Felipe Aron¹⁻²⁻³⁻⁶, Carla Hervías¹, Marcela Bilbao¹, Gaspar González¹, Giovanni Menanno¹, Nicolás Pérez-Estay¹⁻⁴, Alejandro Sanhueza¹, Alejandro Silva¹, Leonardo Toledo¹, Gonzalo Yáñez²⁻⁵

(1) Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), Ministerio de Relaciones Exteriores, Unidad de Asuntos Estratégicos-Plataforma Continental, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(3) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Santiago, Chile

(5) United Nations, Commission on the Limits of the Continental Shelf (CLCS), New York, NY, USA

(6) *Now at Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Articles 76 and 121 of the United Nations Convention of the Law of the Sea established that coastal states, including islands, are entitled to extend their continental shelf beyond 200 nautical miles from the coast baselines, throughout the natural prolongation of its land territory. However, as portrayed in the Scientific and Technical Guidelines of the Commission on the Limits of the Continental Shelf, for cases involving islands the delimitation of the Continental Shelf is often challenged by the non-traditional configuration of their continental margin. We present a novel, geologically self-consistent, and replicable rationale to determine the continuity and submerged prolongation of the land mass, for islands located atop seamounts running along ridges formed by hotspot volcanic chains – a fundamental input to constrain the envelope containing the base of the continental slope. Our method relies primarily on the morphological continuity of the seafloor high and secondarily, on the distinct and continuous sub-bottom crustal structure of the volcanic chain and can be implemented at a low cost with publicly available data. To illustrate this rationale, we use the example of the Easter and Salas y Gómez islands, part of the Easter Island Province (EIP) of Chile, and its submerged prolongation along the Salas y Gómez Ridge (SGR). These volcanic islands constitute one of the world's most representative examples of a hotspot fed by a mantle plume, resulting in a thousands-of-kilometers-long chain of volcanic edifices along the SGR interrupting the Nazca oceanic plate. The ridge's crustal structure has been obliterated by new materials added by the plume, of different composition and density than the deep ocean floor (DOF). The SGR rocks grow older in the direction of plate motion and show a clear petrological affinity to enriched lavas of the type ocean island basalts, typically produced by mantle plumes, which are different from the rocks comprising the DOF formed at mid-ocean ridges.

First, we used high-resolution bathymetry and residual bathymetry analysis to determine the submerged continuity and extension of the seafloor high, starting at the island's land mass and following the crest of seamounts and saddles running along the SGR. We show that the continuous crest or "spine" of the ridge rises significantly higher above the depth and roughness of the DOF. Second, the width and length of the submarine mountain chain was mapped onto filtered bathymetric grids that accentuate bathymetry points marking the trend of peaks and saddles defining a ridge crest, over the relatively flat points belonging to the DOF. That resulted in an area enclosing the SGR, bounded by the base or "piedmont" of the mountain chain, defining the geomorphic extent of the submerged prolongation of the continental margin of the islands. Third, we used seismic reflection imaging, gravity anomaly and flexural modeling, to determine the lateral extension across the ridge of the thick, sub-bottom crustal root sustaining the mountain chain. The transition zone between the obliterated root's thick crust and the relatively thinner oceanic crust of the DOF, projected upward onto the ocean floor, spatially coincides with the geomorphically determined piedmont of the volcanic chain. Consequently, superposing these two independently determined areas flanking the sides of the SGR results in the region where the continental margin of EIP, represented by the submarine mountain chain, transitions into the DOF. Given that there are more than 30 islands located on hotspot seamount chains, many of small developing states, we propose that such a workflow can be deployed broadly and affordably to support these types of cases for extension of the Continental Shelf.

Keywords: Continental Shelf, Continental Margin, Hot-spot ridge islands, United Nations Convention of the Law of the Sea (UNCLOS), Article 76.

Relación entre variaciones en deformación de antearco y comportamiento sísmico en el segmento Andreanof de las Islas Aleutianas, Alaska

Valeria Cortés Rivas¹, Donna Shillington¹, Dan Lizarralde², Brian Boston³, Hannah Mark²

(1) Northern Arizona University, Estados Unidos
 (2) Woods Hole Oceanographic Institution, Estados Unidos
 (3) Auburn University, Estados Unidos

Megathrust slip has been observed to happen in a variety of mechanisms that are encompassed by two end-members: earthquakes and aseismic slip [Peng and Gombert 2010]. In some regions of subduction zones, the slip in the megathrust is mostly accommodated by one mechanism over the other [e.g. Li and Freymueller 2017; Wallace et al., 2004]. What determines megathrust slip behavior in a region is still under debate. Additionally, the relationship between the preferred slip style over short, earthquake-cycle time scales and long-term patterns of deformation also remains poorly understood and debated.

We collected multichannel seismic data (MCS), USGS legacy reflection data, and gravity data in the Andreanof segment of the Aleutian Islands to address these questions. This is a seismically and volcanically active region – the 1957 M8.6 and 1986 M8.0 earthquakes ruptured this part of the Aleutian subduction zone – with contrasting seismic and locking behavior from west to east. There is a higher recurrence of large earthquakes and tsunamis in the western section. Moreover, GPS data show variations in coupling, with higher coupling to the west than to the east [Cross and Freymueller 2008], which correlates with the contrasting earthquake history. Moreover, the oblique subduction leads to strain partitioning. As a consequence, the upper plate developed strike-slip faults and rotating blocks [Geist et al., 1988; Ryan and Scholls 1989], impacting the distribution of compressional and extensional stress. Our study area covers the Andreanof block.

Our observations show that the eastern region, Atka, and the western region, Adak, have different forearc deformation styles. Atka has a wide forearc basin with flat layers, whereas Adak shows more compression by uplifting the frontal prism, shortening and deepening the forearc basin, and tilting and faulting the sediment layers within the basin. Adak shows intracrustal reflectors that could be magmatic intrusions, underplating, or old deformational features. The more compressional strain field in Adak correlates with a higher degree of coupling and a higher recurrence of large megathrust earthquakes than Atka.

The incoming plate properties, sediments, and trench infill show similar characteristics in the entire Andreanof segment. Thus we propose that overriding plate properties may contribute to the different seismic and deformational styles. The combination of differences in rheology due to magmatic intrusions, underplating, and/or pre-existing deformational features and differences in tectonic stress associated with rotating blocks could impact fault development and changes in forearc permeability. We explore the hypothesis that a high compressional strain field in the western section could be more efficient in releasing pore fluid pressure, increasing the effective stress, which promotes coupling and deformation.

Oblique subduction and strain partitioning are commonly found in subduction systems worldwide and impact forearc deformation by more than just strike-slip faulting. Feedback between overriding plate rheology, faulting, and permeability similar to those we hypothesize in the Andreanof segment could influence slip behavior and locking in other subduction zones.

Keywords: MCS, Forearc, Antearco, Islas aleutianas, Comportamiento sísmico.

Financing: Funding was provided by NSF grants OCE-2031725, OCE-1753704.

Acknowledgments: Thanks to the crew and scientific staff of the R/V Marcus G Langseth and personnel from the OBS team at Scripps OI and WHOI.

References:

- Cross, R. S., & Freymueller, J. T. (2008). Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B7). <https://doi.org/10.1029/2007JB005136>.
- Geist, E. L., Childs, J. R., & Scholl, D. W. (1988). The origin of summit basins of the Aleutian Ridge: Implications for block rotation of an arc massif. *Tectonics*, 7(2), 327-341. <https://doi.org/10.1029/TC007i002p00327>.
- Li, S., & Freymueller, J. T. (2018). Spatial variation of slip behavior beneath the Alaska Peninsula along Alaska-Aleutian subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 45, 3453–3460. <https://doi.org/10.1002/2017GL076761>.
- Ryan, H. F., & Scholl, D. W. (1989). The evolution of forearc structures along an oblique convergent margin, central Aleutian arc. *Tectonics*, 8(3), 497-516. <https://doi.org/10.1029/TC008i003p00497>.
- Wallace, L. M., Beavan, J., McCaffrey, R., & Darby, D. (2004). Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12). <https://doi.org/10.1029/2004JB003241>.

Condiciones de formación, proveniencia y asociaciones minerales de nódulos polimetálicos asociados a dorsales asísmicas entre los 24°-26°S, en la cuenca del Pacífico Sureste

Josías Figueroa Vargas¹, Ximena Contardo Berríos²

(1) Universidad Andrés Bello, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

Escasos antecedentes se tienen sobre la génesis, asociación mineralógica, geoquímica y ocurrencias de nódulos polimetálicos particularmente asociado a las islas oceánicas del Pacífico suroriental, frente a las costas de Chile. En este trabajo se analizó la composición y características de nódulos polimetálicos y sedimento marino adyacente, recuperado desde estaciones situadas entre la zona de la cordillera de Nazca y las islas Salas y Gómez (24°- 26°S), de modo de evaluar las condiciones de formación, proveniencia y asociaciones minerales de nódulos polimetálicos, asociados a dorsales asísmicas en la cuenca del Pacífico sureste. Las muestras analizadas, fueron obtenidas en el marco de la expedición EPIC 2019, a bordo del buque científico "Mirai", de la agencia japonesa JAMSTEC, donde se recolectaron 7 testigos de sedimentos, dos de los cuales contenían fragmentos correspondientes a nódulos. Estas muestras se localizan en la base del monte submarino Pearl y en la base de la dorsal de Iquique, a una profundidad de 3.982 metros y 4.114 metros, respectivamente. Se realizaron análisis en secciones transparentes-pulido, DRX, análisis geoquímicos ICP-MS y SEM. La mineralogía imperante en nódulos corresponde a hematita, goethita, jarosita olivino y plagioclasas. Mediante difracción de rayos X se detectó la composición de oxihidróxidos de hierro y manganeso, seguidos de cuarzo, plagioclasa y olivino destacando birnessita (ox. de Mn), rodocrosita (carbonato de Mn) y ferrihidrita como principales elementos formadores de nódulos. Entre los fragmentos se identificó además una muestra de basalto, con alteración a iddingsita, plagioclasa cálcica y minerales metálicos. Los sedimentos se caracterizan principalmente por minerales como calcita, halita y arcillas, entre otros. A partir de los análisis geoquímicos, se observaron bajas concentraciones de Nd y anomalía negativa de Ce en el nódulo SPG2 y altas concentraciones de Nd y anomalía de Ce positiva en el nódulo SPG-5B relacionando la formación de los nódulos a precipitación diagenética e hidrogeológica, respectivamente.

Palabras Clave: Geología Marina, Nódulos Polimetálicos, Elementos Críticos, Cuenca del Pacífico Sureste.

Financiamiento: Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile.

Agradecimientos: Al proyecto Deep Sea soft bottom benthic communities: Explor. Biogeog. and genetic connect. from southeast Pacific Seamounts, del Dr. Eduardo Quiroga (QEPD), de la PUCV y el Dr. Eulogio Soto, de la UV.

Referencias:

- Bau, M., Koschinsky, A., Dulski, P., Hein, J. R., (1996). Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. *Geochim. Cosmochim.*
- Hein, J., Koschinsky, A. (2014). Treatise on Geochemistry 2nd edn Vol. 13 Ch. 11 (eds Holland, H. D. y Turekian, K. K.) 273–291 (Elsevier).
- Hein, J., Koschinsky, A., Kuhn, T. (2020). Nódulos polimetálicos de aguas profundas como recurso para materiales críticos. *Nat Rev Earth Environ* 1, 158– 169.
- Horacek III, H., Soto, E., Quiroga, E., Ingels, J. (2022). Meiofaunal nematode abundance, composition, and diversity at bathyal to hadal depths in the Southeast Pacific Ocean, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Volume 188, 103837, ISSN 0967-0637.
- Koschinsky, A., Hein, J. (2017). Marine ferromanganese encrustations: archives of changing oceans.
- Kozowska-Roman, A., Mikulski, S. (2021). Chemical and morphological characterization of polymetallic (Mn-Fe) nodules from the Clarion-Clipperton Zone in the Pacific Ocean. *Geological Quarterly*, 65: 57.
- Kuhn, T., Węgorzewski, A., Rühlemann, C. y Vink, A., (2017). Deep-Sea Mining (ed. Sharma).

Preliminary evidence of the submarine trace of the Liquiñe-Ofqui fault zone

Juan González¹⁻², Valeria Cortes³, Juan Díaz-Naveas⁴, Donna J. Shillington³

(1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Northern Arizona University, School of Earth and Sustainability, 624 S Knoles Drive, Flagstaff, Arizona, EE. UU.

(4) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Escuela de Ciencias del Mar, Av. Universidad 330, Valparaíso, Chile

The presence of the Coastal Range and the Intermediate Depression characterizes the Chilean continental forearc between 33° and 46°. The Coastal Range is mainly formed by metamorphic rocks of the late Paleozoic accretionary prism, continuously exposed from 34°S to the southern region. These metamorphic rocks are locally covered by Tertiary sedimentary and volcanic deposits and Pleistocene glacial sediments. The intermediate depression extends from 33° to 46°, with an extension of about 1,000 km, and a width not exceeding 75 km. Between 38° and 46° S, the eastern limit of the intermediate depression is the volcanic arc, where the Liquiñe-Ofqui Fault Zone (LOFZ) is located. The LOFZ is a 950 km intra-arc transcurrent fault zone with dextral strike-slip kinematics that has been active from the Eocene to the Pliocene and possibly into the Holocene. It is characterized by a series of NNE-SSW lineaments, faults, and areas of ductile deformation along the Mio-Pliocene and Holocene magmatic arcs. Oblique subduction has been considered the driving mechanism for the long-lived dextral displacement along the Liquiñe-Ofqui fault zone. Recently, along strike and dip movements have been identified in the fault zone from detailed information from the ductile deformation areas in the Miocene and Pliocene arc areas, as well as in the brittle, dextral, and transcurrent deformation zone of the Pliocene and Quaternary magmatic arc. The N-S orientation of both the Cenozoic arc and the LOFZ has resulted in that between 41°30'S and 44°S showing geological units elongated in a north-south direction, parallel to the LOFZ. The segment of the continental margin between 41° and 43°S has three main morphological units; from west to east these are (i) the coastal mountain range, (ii) the intermediate depression, represented by the Gulf of Ancud, and (iii) the Southern Andes cordillera. The Gulf of Ancud, a marine extension of the intermediate depression, has undergone tectonic subsidence caused by the subduction of the Nazca plate and has been shaped by glacial processes of erosion since at least the Pleistocene. These geological characteristics, together with the presence of a fault zone (LOFZ), generate an interesting interaction between structural, climatic, and oceanographic processes, in shaping the regional landscape. This contribution shows preliminary results of identifying the/submarine trace of the LOFZ in the eastern Gulf of Ancud, obtained from reflection seismic and bathymetric information extracted from nautical charts.

Keywords: LOFZ, Reflection seismic, Bathymetry, Ancud basin, Marine geology.

New Insights into the Magallanes Fault System of Patagonia based on the CIMAR25 investigations in Chilean Patagonia

Gregory Paul De Pascale¹, **Manuel Hernández**², Daniel Moncada², Francisca Sandoval², Nicolas Buono-Core²

(1) University of Iceland, Institute of Earth Science, 102, Reykjavik, Iceland

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

The up to 1,000 km long Magallanes Fault System (MFS) is a major system of strike slip faults that accommodates plate boundary deformation in Chilean Patagonia. A multi year onshore investigation in Chile and Argentina, both onshore and offshore has yielded new insight into this important neotectonic structure and source of seismic hazard for both Chile and Argentina. Through onshore work (Sandoval and De Pascale, 2020), Late-Cenozoic slip rates along the main Magallanes Fault (MF: i.e. the master fault in the systems of faults found there) of 5.4 ± 3.3 mm/yr was obtained based on lithologic geological separations found in regional mapping of the geology. Late-Quaternary deformation from offset geomorphologic markers was documented along the MFS in Chile and Argentina based on a combination of satellite mapping, fieldwork, and Structure from Motion (SfM) models developed from drone photography collected by the team in the field in Chile and Argentina. By combining displacements observed in SfM models with regional Late-Quaternary dating, sinistral strike-slip rates are 10.5 ± 1.5 mm/yr in Chile and 7.8 ± 1.3 mm/yr in Argentina. These new results (Sandoval and De Pascale, 2020) match well and overlap with research done in parallel and at different sites from ours MF slip rates in Argentina (Roy et al., 2020) where they obtained MF slip rates of 6.4 ± 0.9 mm/yr. Thus, these two studies validate each other well in terms of both total slip reported and with overlapping slip rate values for at least the sites in Argentina. Two other faults that we investigated in the MFS (Sandoval and De Pascale, 2020) in addition to the master MF, the Hope Fault and the Deseado Fault in Chile both showed impressive tectonic geomorphology and paleoseismic seismic investigations along the Deseado fault shows that the most recent rupture there was post the year 1680 for the first time. The timing of the last rupture along the Hope Fault remains unknown. Ongoing work here by our team in the onshore and offshore realm will shed light on this topic both in Chile and Argentina.

Regarding the offshore MFS, a new offshore multibeam echosounder (MBES) dataset was collected during the CIMAR25 cruise in 2019 on the AGS 61 Cabo de Hornos. These data focused on areas along strike with onshore mapping of the main faults in the MFS. Fault-targeted mapping allowed us to collect data along these faults to view the interaction of these active faults with the seabed morphology. Clear strike slip tectonic geomorphology allows us to map the fault locations with accuracy for the first time and track the main faults in the system from Tierra Del Fuego and west into the Straights of Magellan for the first time. Coastal mapping of the geology, structural geology, and geomorphology, allows us to tie the onshore with offshore marine MBES mapping. We present these data here for the first time here which allows us to track how this plate boundary evolves along strike from a relatively narrow band in Argentina in the East onshore, to a wider and less localised fault system further north and west into Chile. Three main faults are visible near Isla Dawson and will be presented in detail. This work forms the basis of the MSc thesis of Manuel Hernandez. By comparing our results with regional models, contemporary plate boundary deformation is narrow, approximately ~20–50 km wide from Tierra Del Fuego (TdF) and east (one of the narrowest on Earth), which widens and becoming more diffuse from Cabo Froward north and west (>100 km wide). In addition to the neotectonic implications, the faults in the MFS should be considered important sources of fault rupture and seismic hazard both in Chile and Argentina and remain a world class tectonic laboratory.

Palabras Clave: Magallanes Fault System, Seismic hazard, Marine geology, Straight of Magellan, Tierra Del Fuego.

Financiamiento: Fondecyt 11160038 to Gregory De Pascale; CIMAR 25 (CONA/SHOA) to Gregory De Pascale; CIMAR 25 (CONA/SHOA) to Daniel Moncada.

Referencias:

- Roy, S., Vassallo, R., Martinod, J., Ghiglione, M.C., Sue, C. and Allemand, P., 2020. Co-seismic deformation and post-glacial slip rate along the Magallanes-Fagnano fault, Tierra Del Fuego, Argentina: Terra Nova, 32, 1–10, [doi: 10.1111/ter.12430](https://doi.org/10.1111/ter.12430).
- Sandoval, F.B., De Pascale, G.P. Slip rates along the narrow Magallanes Fault System, Tierra Del Fuego Region, Patagonia. Sci Rep 10, 8180 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64750-6>.

South Pacific Antarctic Intermediate Water during the last deglacial global atmospheric CO₂ increases

Cyrus Karas¹, Dirk Nürnberg², Fabrice Lambert³, Frank Lamy⁴, Jaime Pizarro¹

(1) Universidad de Santiago de Chile, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins No. 3363, Estación Central, Santiago, Chile

(2) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

(4) Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research, Am Alten Hafen 26, 27568, Bremerhaven, Germany

Antarctic Intermediate Water (AAIW) forms in the Southern Ocean and is currently one of the main sinks of atmospheric CO₂. During the last deglaciation (21,000-10,000 years before present), atmospheric CO₂ levels increased significantly during two specific time periods, the Early Deglaciation (~17.5-14.7 ka BP) and the Younger Dryas (~12 ka BP). Model simulations and data studies suggest that processes in the Southern Ocean were crucial in explaining these changes. Deep mixing and upwelling occurred during the deglaciation in the Southern Ocean, close to where AAIW is formed, leading to degassing of CO₂ formerly stored in the deep ocean. These processes may have influenced the composition of the newly formed AAIW, and hence its role in atmospheric CO₂ changes, but its variability and properties in the Pacific Ocean are still unclear. To fill this gap, we show over the last 30,000 years benthic foraminiferal carbon and oxygen isotopes, benthic Mg/Ca bottom water temperatures, salinity reconstructions and grain size analyses (sortable silt paleo current proxy) from deep sea Ocean Drilling Program (ODP) Site 1233 in the Southeast Pacific Ocean off Chile. Our bottom water temperatures show a ~4°C warming during deglaciation and salinity reconstructions indicate a freshening during the Early Deglaciation, however, there is no long-term trend from the Last Glacial until the Holocene. Benthic carbon isotopes show clearly lower values (of up to ~1 ‰) during the Early Deglaciation-Younger Dryas accompanied by markedly increased Sortable Silt values. These changes appear synchronously with evidence of major upwelling in the Southern Ocean, appearance of old water masses at intermediate water depths in the North Pacific Ocean, major increase in atmospheric CO₂, and negative atmospheric carbon isotope values in Antarctic ice cores. We interpret our observed low d¹³C values in combination with increased Sortable Silt values as direct evidence for increased AAIW circulation and the entrainment of low d¹³C into AAIW that most likely stem from upwelling of deep and old ocean water masses in the Southern Ocean. Our results hence support existing hypotheses that AAIW circulation increased during the Early Deglaciation and that Circumpolar Deep Waters with low d¹³C formerly isolated from the atmosphere entrained into AAIW with consequences for the global increase of atmospheric CO₂ and low latitude primary productivity.

Keywords: AAIW, Last deglaciation, CO₂, South Pacific Ocean, Mg/Ca temperatures.

Petrological heterogeneities at the metric to micrometric scales of mantle rocks from the Taitao ophiolite, Aysén Region, Chile

Catalina Marín Oyarzún¹, Manuel Schilling¹, Alexandre Corgne¹, Gaelle Plissart¹, Maite Alvear¹, Emilio González¹, Kuan-Yu Lin², Norikatsu Akizawa³, Jessica Warren², Ana Rivera¹

(1) Universidad Austral de Chile, Ciencias de la Tierra, Ciencias, Valdivia, Chile

(2) University of Delaware, Department of Earth Sciences, Delaware, USA

(3) University of Tokyo, Department of Ocean Floor Geoscience, Atmosphere and Ocean Research Institute, Kashiwa, Japan

In the last few decades, models have been proposed to explain chemically and isotopically heterogeneous mantle at various scales. The main processes responsible for variations in suboceanic mantle rock compositions include variable degrees of melt depletion, metasomatism, and lithospheric recycling (e.g., Warren, J. M., 2016; Bodinier & Godard, 2013). Petrographic, chemical, and isotopic characterization of mid-oceanic ridge basalts (MORB), abyssal peridotites, and ophiolites have shed light on the spatio-temporal scales at which these processes occur. The biggest advantage of ophiolite, which represent slivers of oceanic lithosphere obducted onto continental convergent margins, is that we can see the spatial relation between mantle rocks, which is not available from seafloor collections like MORB or abyssal peridotites.

The Taitao ophiolite is located approximately 50 km south of the Chile Triple Junction, where the Chile Ridge is currently subducting beneath the South American continental plate (e.g., Nelson et al., 1993) and represents a typical oceanic ridge-type ophiolite exhibiting a complete Penrose-type sequence. Several studies have suggested that the ophiolite was emplaced about 6 Ma ago following a series of collisions of Chile ridge segments (e.g., Anma et al., 2006). Previous works have reported petrological characteristics of distinct lithological units that compose the ophiolite at the kilometer scale, mostly to understand petrological processes registered at the modern suboceanic mantle under the south-east Pacific Ocean. However, there has been no systematic characterization at the metric and micrometric scales of these units. The study of small-scale heterogeneities in the mantle unit is particularly interesting because it can provide important spatial and time constraints about depletion and enrichment processes, the interplay between melt transport, deformation, metasomatism, and the formation of different suboceanic mantle domains.

We studied the lithological, petrographic and chemical heterogeneities at metric and sub-metric scales in order to advance the understanding of the processes associated with magma generation and metasomatism, as well as the effects caused by the migration of melts and fluids in the suboceanic mantle. In particular, we studied three sites of the Taitao ophiolite mantle unit during a field campaign in January 2022. We sampled the lithologies and their contact relationships identified within outcrop areas between 5 and 10 m². Observed lithologies correspond mainly to harzburgite and lherzolite with dunite channels and pyroxenite layers frequently cut by late pegmatitic gabbros and diabase dikes. Preliminary results based on field observations and microscope petrography indicate that the harzburgites and lherzolites, as well as the dunites channels are usually associated with moderate to high extents of serpentinization. They contain abundant fresh primary pyroxenes and olivine as well as different alteration minerals such as magnetite, antigorite, brucite and chrysotile. Deformation textures in pyroxenes, inclusions in pyroxenes and chromites, and recrystallization of minerals were identified in harzburgite and lherzolite. Foliation and preferential mineral orientation in gabbro and diabase dikes. Measurements of the chemical composition of minerals and bulk rocks are currently underway. They will provide insights into the origin of dunite channels and ultramafic/mafic dykes and their influence on the host mantle lithologies.

Keywords: Taitao Ophiolite, Suboceanic mantle, Melt-rock interactions, Metasomatism, meter scale sampling.

Financing: This research was financed within the framework of the FONDECYT regular 1211820 project.

References:

- Anma, R., Armstrong, R., Danhara, T., Orihashi, Y., Iwano, H., 2006. Zircon sensitive high mass-resolution ion microprobe U-Pb and fission-track ages for gabbros and sheeted dykes of the Taitao ophiolite, Southern Chile, and their tectonic implications. *Island Arc* 15, 130–142.
- Bodinier, J. L., & Godard, M. (2013). Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. *Treatise on geochemistry*, 2, 568.
- Haller, M., O'Driscoll, B., Daly, J.S., Piccoli, P., Walker, R. 2021. Meter-Scale Chemical and Isotopic Heterogeneities in the Oceanic Mantle, Leka Ophiolite Complex, Norway. *Journal of Petrology*. 62. 12.
- Nelson, E., Forsythe, R., Diemer, J., Allen, M., Urbina, O., 1993. Taitao ophiolite: a ridge collision ophiolite in the forearc of southern Chile (46° S). *Rev. Geológica Chile* 20, 137–165.
- O'Driscoll, B., Walker, R.J., Clay, P.L., Day, J.M.D., Ash, R.D., Daly, J.S., 2018. Length-scales of chemical and isotopic heterogeneity in the mantle section of the Shetland Ophiolite Complex, Scotland. *Earth Planet. Sci. Lett.* 488, 144–154.
- Schulte, R.F., Schilling, M., Anma, R., Farquhar, J., Horan, M.F., Komiya, T., Piccoli, P.M., Pitcher, L., Walker, R.J., 2009. Chemical and chronologic complexity in the convecting upper mantle: Evidence from the Taitao ophiolite, southern Chile. *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 5793–5819.
- Warren, J. M., 2016. Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos*, 248, 193–219.

Mineralogía de nódulos polimetálicos de la zona Clarion-Clipperton del Océano Pacífico

Valentina Mella Arredondo¹, Daniel Moncada², Francisco Hervé¹⁻², Lucía Villar³

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Ingeniería, Sazié 2119, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Ciencias físicas y matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Geofísica, Ciencias físicas y matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

La zona Clarion-Clipperton (CCZ) se ubica en el océano Pacífico, entre las fracturas Clarion y Clipperton, su extremo oriental está frente a México y Hawai, tiene una magnitud aproximada de 6 millones de Km² (Jones, D. et al., 2021), dimensión equivalente a 390 veces la región Metropolitana de Chile. Esta zona se caracteriza por tener altos contenidos de metales en el fondo marino, como lo son el manganeso, níquel, cobalto y cobre, siendo este último el que despierta el interés de la minería mundial (Hein, J. et al. 2013). La CCZ es un patrimonio de la humanidad que se encuentra resguardado por la Autoridad de los Fondos Marinos (ISA), la cual organiza y controla las actividades relacionadas con los recursos minerales en la zona en beneficio de la humanidad (About ISA – International Seabed Authority, s.f.).

Este lugar se encuentra a una profundidad que varía desde 4000 a 4100 metros bajo el nivel del mar, aproximadamente, y con una presión que fácilmente puede ser más de 400 bares (BBC News Mundo, 2017). Estudios realizados e interpretados por Jones, D. et al., 2021, muestran que el agua de la zona Clarion-Clipperton está compuesta por masas de agua correspondientes a las corrientes polares centrales inferiores (Lower Central Polar Water, LCPW) y a las del Atlántico norte (North Atlantic Deep Water, NADW), lo que genera una variación de las condiciones del agua. Además, para la zona noroeste, se describe temperatura de 1,2 °C, salinidad de 3,4 y oxígeno de 2,8 mL, a una profundidad de 4.200 metros. (Jones, D. et al., 2021)

La CCZ es el área geológica que alberga mayor cantidad de nódulos polimetálicos en las zonas exploradas del planeta, contiene en promedio 15 kg/m² de nódulos, se estima que alberga 27.000 millones de toneladas de nódulos (BBC News Mundo, 2017), lo que la convierte en un área de alto potencial económico (Hein, J. et al, 2013). El litio presente en los nódulos tiene un promedio de 131 ppm (Hein y Koschinsky, 2013), por lo que un claro ejemplo del potencial económico de los nódulos estaría relacionado con la creciente demanda del litio, pues se estima que para el año 2050 será necesario 3 billones de toneladas (The World Bank 2020), producto del avance de las tecnologías, ya que es requerido principalmente para baterías, incluyendo la modernización de los automóviles eléctricos e híbridos.

Aún se estudian los fenómenos que han provocado esta anomalía geológica, generando la alta densidad de nódulos en el fondo marino, a pesar de esto, gracias a estudios geoquímicos realizados en la CCZ, en sedimentos cercanos a la isla Clarion, se conoce que la alta concentración de nódulos es debido a procesos hidrotermales, con nódulos ricos en Fe, Cu, Mn, Ni y Cu (Hoz, R; Edwards, C. 1993). Hoy la CCZ tiene 32% de su territorio bajo contratos de exploración, 35% está asignada como área protegida y otro 33% está reservada para exploración por parte de países en desarrollo. (BBC News Mundo, 2017).

Según Hein, J. et al. (2013), los nódulos polimetálicos o también llamados nódulos polimetálicos de Fe-Mn, crecen por acumulaciones de elementos como Fe, Mn, Ni y Cu, entre otros, alrededor de un núcleo (este puede ser de roca volcánica, fragmento biogénico o de un nódulo anterior). Los nódulos adquieren metales de forma hidrogenética o diagenética. Los oxihidróxidos de Fe Mn, residen en el lecho marino durante largos períodos de tiempo donde se incorporan metales del agua de mar por adsorción, sustitución y coprecipitación con los óxidos principales (Koschinsky y Hein, 2003). Gracias a su propiedad física de estructuras en lámina y túnel de las fases diagenéticas de óxidos de Mn, se genera la adquisición de los fluidos con contenidos de Ni y Cu, entre otros (Hein, J. et al. 2013). En las principales condiciones de formación, se sabe que es óptima una baja tasa de sedimentación y una alta disposición de núcleos (Cronan, 2010).

El crecimiento de los nódulos es de, aproximadamente, 0,8 mm/M.a. (Glasby, 2006). El tamaño de estos, en la zona Clarion-Clipperton, varía a un tamaño máximo de 8 cm (Morgan, 2000). Su forma puede variar de prolata a oblata, según su esfericidad.

Por medio de estudios en nódulos de 2 a 4 centímetros de diámetro, se busca saber cuál es la importancia de estos nódulos polimetálicos y comprender los factores que permiten estas anomalías geológicas. Para esto se realizará recopilación bibliográfica y se analizarán unas muestras de la zona Clarion-Clipperton, por medio de estudios petrográficos utilizando cortes transparentes, caracterizándose con métodos no destructivos como la espectroscopía Raman, esperando obtener respuestas que sean un aporte para la ciencia. Además, se estima que estos tienen una edad de 25 a 50 millones de años.

Palabras Clave: Nódulos polimetálicos, Recursos minerales, Nuevas tecnologías.

Financiamiento: FONDEQUIP EQM170103 Proyecto FONDECYT 11170210.

Agradecimientos: Agradecimientos a la empresa The Metals Company, a FONDEQUIP EQM170103 y Proyecto FONDECYT 11170210.

Referencias:

- About ISA. (s/f). Org.Jm. Recuperado el 23 de mayo de 2023, de <https://www.isa.org.jm/about-isa/>. BBC News Mundo. (2017, 5 julio). Cómo es Clarion-Clipperton, la enigmática y rica zona del océano Pacífico entre México y Hawái que puede definir el futuro de la minería.
- BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40502277>.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., & Monreal-Gómez, A. (1993). Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. Marine Geology, 112(1–4), 257–269.

- Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A., & Conrad, T. A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1–14.
- Hund K., La Porta, D., P. Fabregas, T., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. 2020 International Bank for Reconstruction and Development The World Bank, 112.
- Jones, D. O. B., E. Simon-Lledó, D. J. Amon, B. J. Bett, C. Caulle, L. Clément, D. P. Connelly, T. G. Dahlgren, J. M. Durden, J. C. Drazen, J. Felden, A. R. Gates, M. N. Georgieva, A. G. Glover, A. J. Gooday, A. L. Hollingsworth, T. Horton, R. H. James, R. M. Jeffreys, C. Laguionie-Marchais, A. B. Leitner, A. Lichtschlag, A. Menendez, G. L. J. Paterson, K. Peel, K. Robert, T. Schoening, N. A. Shulga, C. R. Smith, S. Taboada, A. M. Thurnherr, H. Wiklund, C. R. Young and V. A. I. Huvenne (2021). Environment, ecology, and potential effectiveness of an area protected from deep-sea mining (Clarion Clipperton Zone, abyssal Pacific). *Progress in Oceanography* 197: 102653.
- Koschinsky, A., & Hein, J. R. (2003). Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: solid-phase associations and seawater speciation. *Marine Geology*, 198(3–4), 331–351.
- Low, A; Peters, E. (2014) La frontera final: El océano profundo. Pág 31-55. México.

Variaciones océano-climáticas holocenas registradas en sedimentos marinos de la costa semiárida de Chile

Cristina Ortega Caurapan¹, Francisco Fonseca², Gabriel Easton³

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(2) Terra Ignota, Domingo Toro Herrera 1451, Ñuñoa, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Santiago, Chile

Se presenta la reconstrucción de las variaciones océano-climáticas de la costa semiárida de Chile (~30°S) durante el Holoceno, basado en el análisis de dos testigos de sedimento del fondo marino de las bahías de Tongoy y de Guanaqueros. Las variaciones identificadas están basadas en indicadores sedimentarios y ecológicos. Los indicadores sedimentarios fueron obtenidos a partir de técnicas como granulometría láser, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y espectroscopía de absorción infrarroja por transformada de Fourier. Mientras que los indicadores ecológicos se obtuvieron a partir del reconocimiento y cuantificación de las especies de foraminíferos bentónicos presentes en los sedimentos, a partir de los cuales se confeccionaron curvas de abundancia. El modelo geocronológico de los testigos de sedimento se realizó en base a edades de ¹⁴C y ²¹⁰Pb.

En términos generales, los indicadores sedimentarios y paleoecológicos evidencian que durante el Holoceno temprano las bahías presentaban un ambiente sublitoral, caracterizado por un nivel del mar más bajo con respecto al presente, junto con condiciones bajas de oxígeno y temperaturas frías. Luego, durante el Holoceno medio las bahías evidencian una transición desde un ambiente sublitoral a uno de plataforma interna, asociada al aumento del nivel del mar, con condiciones de oxigenación aún más bajas y temperaturas más cálidas en comparación con el Holoceno temprano. También se interpreta una baja escorrenría de sedimentos desde la cuenca asociado a lluvias torrenciales previo a los ~5.000 años AP. Luego, durante el Holoceno tardío se mantiene el ambiente de plataforma interna, pero con una mayor oxigenación respecto del Holoceno medio, y un mayor aporte de sedimentos desde la cuenca asociado a una intensificación y/o mayor frecuencia de lluvias torrenciales. Se plantea que estas variaciones océano-climáticas están estrechamente relacionadas con cambios en las condiciones tipo-ENSO (El Niño – Oscilación del Sur) durante el Holoceno.

Palabras Clave: Sedimentos Marinos, Holoceno, Paleoclima, Foraminíferos, Costa semiárida de Chile

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por: Beca Doctoral CONICYT #21070102 (CO), Beca de Apoyo a la Realización de Tesis Doctoral CONICYT #24090198(CO), Beca de Movilidad Doctoral 2012 - Instituto Francés de Chile / Universidad de Chile (CO), Proyecto Fondecyt Postdoctoral #3150706 (CO), Proyecto Fondecyt Regular #11060484 (GV), Proyecto Fondecyt Regular #1201387 (GV).

Agradecimientos: Agradecemos el apoyo de: Dr. Ortlieb†, Dr. Sifeddine e Ing. Boucher del IRD. De la Dra. Marchant de la UdeC. Y la ayuda del Blgo. Ávila y la tripulación de la embarcación Stella Maris R/V.

Flexural response and magma production rate of the Easter Hotspot

Nicolás Pérez Estay¹⁻²⁻³, Felipe Aron¹⁻³⁻⁴⁻⁵, Giovanni Menanno¹, Alejandro Sanhueza¹, Carla Hervías¹, Marcela Bilbao¹, Gaspar González¹, Alejandro Silva¹, Leonardo Toledo¹, Gonzalo Yáñez Carrizo¹⁻⁵⁻⁶

(1) Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), Ministerio de Relaciones Exteriores, Unidad de Asuntos Estratégicos-Plataforma Continental, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(5) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(6) United Nations, Commission on the Limits of the Continental Shelf (CLCS), New York, NY, USA

Magma production rate varies on the Earth over geological time and within different tectonic settings. Oceanic Hotspots are punctual volcanic systems fed by anomalously hot mantle plumes that represent the second major magma extrusion source on Earth after the oceanic ridges (White et al., 2006). Despite its enormous amount of magma production, only limited information is available about the eruption- and magma production-rates (or magma flux measured in m^3/s) of many individual hotspots at geological time scales. In this contribution we reconstructed the geologic history of magma flux for the mantle plume feeding the Easter Hot-spot, one of the most prominent and active hot-spot volcanic chains of the Pacific Ocean (Courtillot et al., 2003).

To address this, first we decoupled the Nazca plate bathymetric signal related to the normal seafloor spreading processes (i.e., the unperturbed deep ocean floor) from the anomalous topography that has been constructed by the activity of the Eastern hot-spot trail. Second, we employed the two methodologies available in the literature to isolate volcanic mountains generated by a hot-spot from the bathymetrical signal created by the swell uplift deformation process: i) the optimal robust separator (ORS); and ii) the MiFil method (Wessel, 2016; Adam et al., 2005). These methods provide a mechanism to emphasize seafloor highs that are not related to the deep ocean floor. The outcome of this process, which includes the isolated signal of the volcanic mountain chain, were employed to compute the flexural response of the lithosphere assuming a variable elastic thickness (T_e) (Watts, 2001; Wessel, 2016). The elastic thickness was constrained by the age of the oceanic plate at the time it was loaded, which was calculated from a regional age grid (Seaton et al., 2020) and the age-track of the hotspot chain (Ray et al., 2007). We assumed three probabilistic scenarios: a maximum, the physical expected value, and a minimum value of T_e (e.g., Wessel, 2016). After computing the volcanic edifices and the flexural response, a preliminary magma flux was estimated employing time-windows of 0.1 Ma, obtaining a time-dependent magma flux function between the present and ~30 Ma ago.

Our preliminary results indicate that magma production of the Eastern Hot-spot varies between 0.4 and 6 m^3/s , depending on the applied swell filter method (ORS or MiFil). Periodicity of magma flux shows peak of productions with temporal separation ranging between 2 and 5 Ma. The range of values of magma flux suggest that the Easter Hot-spot has a magma flux lower than Hawaii, but greater than several other hot-spots such as Walvis and St. Helena. Finally, we propose that our quantification of magma flux could be employed to constrain the range of reliable magnitudes of future volcanic eruptions.

Keywords: Easter Hotspot, Flexural modeling, Magma Flux, Volcanism, Marine geoscience.

Acknowledgments: This contribution has been partially funded by DIFROL (National Department of State Borders and Boundaries, Chilean Ministry of Foreign Affairs).

References:

- Adam, C., Vidal, V., & Bonneville, A. (2005). MiFil: A method to characterize seafloor swells with application to the south central Pacific. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004GC000814>.
- Courtillot, V., Davaille, A., Besse, J., & Stock, J. (2003). Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3), 295–308. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8).
- Ray, J. S., Mahoney, J. J., Duncan, R. A., Ray, J., Wessel, P., & Naar, D. F. (2012). Chronology and Geochemistry of Lavas from the Nazca Ridge and Easter Seamount Chain: an ~30 Myr Hotspot Record. *Journal of Petrology*, 53(7), 1417–1448. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs021>.
- Watts, A. (2001). *Isostasy and Flexure of the Lithosphere* (Vol. 458).
- Wessel, P. (2016). Regional-residual separation of bathymetry and revised estimates of Hawaii plume flux. *Geophysical Journal International*, 204(2), 932–947. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv472>.
- White, S. M., Crisp, J. A., & Spera, F. J. (2006). Long-term volumetric eruption rates and magma budgets. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005GC001002>.

Origin and evolution of albitites present in the Taitao ophiolitic sequence (Taitao Peninsula, Aysén Region, Chile)

Ana Rivera Salgado¹, Gaëlle Plissart², Manuel Schilling², Alexandre Corgne², Kuan-Yu Lin³, Norikatsu Akizawa⁴, Jessica Warren³

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Ciencias, Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Ciencias, Isla Teja, Valdivia, Chile

(3) University of Delaware, Department of Earth Sciences, United States

(4) The University of Tokyo, Department of Ocean Floor, Atmosphere and Ocean Research Institute, Kashiwa, Japan

The Taitao ophiolite is located 30 km southeast of the Chilean Triple Junction and is composed of a basal ultramafic unit made of lherzolites, harzburgites and dunites, a gabbro unit that transitions towards a sheeted dyke complex, and an upper volcano sedimentary unit (Nelson et al. 1993; Le Moigne et al. 1996). During fieldwork in 2022, we sampled albitites, which are defined as rocks with more than 90 % vol albite content, within the gabbroic unit of the ophiolitic sequence. This study focuses on the petrological and geochemical characterization of these albitites in order to understand the origin, evolution and temporality with respect to other rocks of the ophiolitic sequence.

Fieldwork relations indicate that the albitites occur as fine-grained, phaneritic dykes intruding and brecciating the gabbros near the Moho transition zone. Microscopic observations and SEM-EDS analyses define an equigranular texture consisting of >90 vol% subhedral albite. Accessory minerals include 200 µm-sized titanite crystals, with REE- and Y-rich sector zoning, and abundant 30 µm-sized zircons found mostly as inclusions in albite and titanite. Titanite also contains ilmenite and clinopyroxene (aegirine-augite-hedenbergite) inclusions. The primary mineral assemblage is thus composed of Ab + Cpx + Ilm + Ttn + Zrc. The samples display secondary disseminated clinozoisite and clinocllore, as well as prehnite in veinlets.

Several geological processes in various contexts can generate albitites, including metasomatism of granitic rocks by hydrothermal fluids (Cathelineau 1988), fluid precipitation (Harlow 1994; Johnson & Harlow 1999) and crystallization of Na-rich magmas (Schwartz 1992). In Taitao, field relationships preclude their formation by metasomatism because they intrude unaltered gabbros. Given that albitites in ophiolites are commonly genetically associated with plagiogranites, which either result from extensive fractional crystallization of basaltic melts or from hydrous partial melting of metagabbros (Li and Li 2003), we speculate that the Taitao albitites crystallized from a magma enriched in Na following one of the two aforementioned processes. EPMA, LA-ICP-MS, bulk-rock analyses and U-Pb zircon dating by SHRIMP are underway and will be shown at the congress. Combined, they will better constrain the origin of these peculiar rocks.

Keywords: Albitites, Taitao ophiolite, Na-rich magmas, SHRIMP U-Pb, Plagiogranite.

Financing: FONDECYT regular 1211820 VIDCA MUJ-INV-2023-04.

References:

- Cathelineau, M., 1988. Accessory mineral alteration in peraluminous granites at the hydrothermal stage: A review: *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, Vol. 43, 499–508.
- Harlow, G., 1994. Jadeites, albitites and related rocks from the Motagua fault zone, *Journal of Metamorphic Geology*, Vol. 12, 49–68.
- Johnson, C., & Harlow, G., 1999. Guatemala jadeites and albitites were formed by deuterium-rich serpentinizing fluids deep within a subduction zone: *Geology*, Vol. 27, 629–632.
- Le Moigne, J., Lagabrielle, Y., Whitechurch, H., Girardeau, J., Bourgois, J., Maury, C., 1996. Petrology and geochemistry of the Ophiolitic and Volcanic Suites of the Taitao Peninsula-Chile Triple Junction Area. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 9, 43–58.
- Nelson, E., Forsythe, R., Diemer, J., Allen, M., Urbina, O., 1993. Taitao ophiolite: a ridge collision ophiolite in the forearc of southern Chile (46° S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 20, No. 2, 137–165.
- Schwartz, M., 1992. Geochemical criteria for distinguishing magmatic and metasomatic albite-enrichment in granitoids: examples from Ta-Li granite Yivhun (China) and the Sn-W deposit Tikus (Indonesia). *Mineralium Deposita*, Vol. 27, 101–108, [doi:10.1007/BF00197092](https://doi.org/10.1007/BF00197092).

Aluviones en Punta Arenas: Potencial registro de eventos recurrentes en el ambiente marino prodeltaico del río Las Minas

Gabriela Tala¹, Rodrigo Fernández Vázquez¹, Cristina Ortega Caurapán², Valentina Flores Aqueveque¹, María Pía Rodríguez Montecinos³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Pl. Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Granaderos 1303, Providencia, Santiago, Chile

(3) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu 358, Copiapó, Chile

La ciudad de Punta Arenas, construida en torno al río Las Minas, ha sido escenario de varios aluviones destructivos que han afectado a miles de personas. Las predicciones climáticas, que en general señalan un aumento de los eventos de precipitación extrema para las próximas décadas, sugieren que los aluviones destructivos podrían ser más frecuentes. Por este motivo, una línea base de largo plazo constituiría una herramienta clave para entender los procesos generadores y condicionantes, su magnitud y su recurrencia. En particular, permitiría comparar los patrones recientes con los anteriores a fin de determinar el carácter de los eventos futuros.

En el presente trabajo se exponen los resultados del estudio de los depósitos sedimentarios marinos que se encuentran frente a la desembocadura del río Las Minas, en el prodelta, con el objetivo de determinar la existencia de un registro sedimentario de eventos aluvionales de larga data y evaluar si existen cambios en su frecuencia.

Para determinar las características del flujo sedimentario originado por el río Las Minas y su probable expresión en el registro sedimentario marino, se analizaron los datos fluvimétricos disponibles de estaciones de la Dirección General de Aguas y se utilizaron modelos numéricos empíricos (Mulder y Syvitski, 1995; Syvitski y Milliman, 2007). De este análisis se determinó que el río Las Minas tiene características de generación principal de flujos hipopícnalos, pero con capacidad de generar flujos hiperpícnalos a partir de la pluma hipopícnal, dado que los valores de concentración de sedimento pueden superar el límite crítico de Parsons et al. (2001) para eventos de alto caudal. El estudio de testigos de sedimento permitió validar la presencia de depósitos originados por flujos densos en el registro sedimentario. En efecto, a través del uso de tomografía computacional con tecnología *dual energy*, granulometría láser y susceptibilidad magnética, se identificaron estructuras sedimentarias y distribución granulométrica de sedimentos siliciclásticos consistentes con facies de hemiturbiditas (intercaladas con hemipelagitas), indicando la presencia recurrente de depósitos originados a partir de flujos densos (corrientes de turbidez o flujos hiperpícnalos secundarios).

La existencia de depósitos asociados a flujos densos también se ve apoyada por la distribución y estratigrafía de la secuencia sedimentaria marina. En efecto, los perfiles sísmicos permiten reconocer la presencia de capas de sedimentos (facies de reflectores de alta y baja intensidad intercalados) que rellenan cuencas ubicadas a más de 5 km de la desembocadura del río Las Minas, con distribución lateral restringida dada por terminaciones de tipo "onlap" o acuñamiento. Las cuencas que son rellenadas por estos depósitos están conformadas por morfología heredada resultado de la acción glacial en la zona, ya que se observaron morfologías consistentes con drumlins y morrenas submarinas, que han sido replicadas por depósitos tipo manto y facies sísmica indicativa de depósitos glaciales (caóticas o semitransparentes).

Análisis geocronológicos en curso indican un mayor grado de complejidad para obtener modelos de edad de depositación para la secuencia sedimentaria estudiada, posiblemente por la influencia de carbón contaminante proveniente de la Formación Loreto que podría interferir con dataciones por vía de ¹⁴C. Con este considerando, preliminarmente y en base a las edades disponibles, se obtuvieron tasas de acumulación sedimentaria de 0,18 – 0,36 [mm/año] para el período 7691-11.025 años AP y 0,12 - 2,38 [mm/año] para el período 2618 – 991 años AP. No obstante, el primer valor podría alejarse de la realidad por efecto de la erosión de capas de sedimento intermedias. Según esos antecedentes, que por ahora deben tomarse como una primera aproximación, se estimó que los eventos aluvionales habrían ocurrido al menos desde hace 7691 ± 70 años AP y que su recurrencia habría aumentado de un orden de miles a uno de cientos de años a partir de los 1.761 – 1.439 años AP.

Se concluye que en el área de estudio existe, de hecho, un registro sedimentario de largo plazo de eventos aluvionales que potencialmente permitirá establecer una línea base para el estudio de la recurrencia y magnitud relativa de eventos recientes y futuros. Sin embargo, y como ha sido notado por trabajos geocronológicos previos en la zona, la determinación de edades confiables es aún un problema a resolver. Futuros trabajos que recuperen mayor cantidad de material sedimentario y el uso de técnicas analíticas geocronológicas que permitan reducir el efecto de carbón contaminante, podrían resolver el problema actual de un marco cronoestratigráfico robusto.

Palabras Clave: Aluvión, Geología Marina, Estrecho de Magallanes, Delta, Hemiturbiditas.

Financiamiento: Comité Oceanográfico Nacional (CONA) y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) como parte del concurso CIMAR-25.

Agradecimientos: Agradecemos a la tripulación del AGS-61 Cabo de Hornos de la Armada de Chile en la expedición de octubre de 2019 por su ayuda en las operaciones de terreno.

Referencias:

- Mulder, T., & Syvitski, J. P. (1995). Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *The Journal of Geology*, 103(3), 285-299.
- Parsons, J. D., Bush, J. W., & Syvitski, J. P. (2001). Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentrations. *Sedimentology*, 48(2), 465-478. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2001.00384.x>
- Syvitski, J. P., & Milliman, J. D. (2007). Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology*, 115(1), 1-19.

Determinación de la plataforma continental extendida en ambientes tectono-magmáticos de interacción de dorsales oceánicas y hotspots: desafíos para la Comisión de Límites de la Plataforma Continental

Gonzalo Yáñez Carrizo¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile

La Comisión de Límites de la Plataforma Continental (CLCS, https://www.un.org/depts/los/clcs_new/clcs_home.htm) tiene por finalidad analizar las presentaciones que hacen los estados parte de la CONVEMAR (Convención de las Naciones Unidas de los Derechos del Mar) para extender su plataforma continental más allá de las 200 M náuticas de acuerdo a las definiciones establecidas por el Art. 76 de la CONVEMAR. A la fecha más de 90 presentaciones de países se han presentado y en algo más de 3 decenas de casos se han completado las recomendaciones.

Si bien el Art. 76 puede ser aplicado en cualquier tipo de margen ribereño, las características geológicas de márgenes pasivos condicionaron las definiciones de la CONVEMAR para llegar a la versión final del Art 76 (definición de fórmula, pie del talud continental + 60M y/o 1% de espesor sedimentario), que está en vigencia desde el año 1997. En consecuencia, no es de extrañar que el gran volumen de casos analizados por la comisión CLCS durante gran parte de su primera década de servicio e inicios de la segunda, hayan involucrado márgenes pasivos con extensas coberturas sedimentarias (cuenca Atlántica y del Caribe) o bien ambientes geológicos con masas continentales sumergidos (Australia). En estos casos la aplicación del Art 76 es relativamente directa y simple dada la correspondencia entre ambiente geológico y las reglas establecidas en este artículo.

Sin embargo, en la última década de revisión de casos por CLCS se ha observado un creciente aumento de los casos en los cuales "masas continentales" asociadas a islas oceánicas generadas por la interacción de sistemas de hotspots y dorsales oceánicas activas han comenzado a ser discutidas y en algunos casos se han obtenido recomendaciones (Noruega en la isla Bouvet, Francia en las islas San Paul y Ámsterdam, Francia y Sudáfrica en archipiélago de Crozet y la isla Prince Edwards, entre otras). La complejidad de estas resoluciones, no exentas de una discusión intensa al interior de CLCS, dice relación con la presencia de procesos geológicos que no están alineados en forma simple con los conceptos geológicos utilizados para la definición del Art. 76 hace 25 años.

El Art. 76 explícitamente indica en su Art. 76.3 que el margen continental, susceptible de ser objeto de una extensión de la plataforma continental, excluye el fondo oceánico y las dorsales oceánicas asociadas. Sin embargo, cuando se produce una interacción entre dorsales oceánicas y magmatismo del Late Neogene terrestre climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and Late Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and tipo de hotspot, muy común en prácticamente todas las cuencas oceánicas (Pacífico: Galápagos, Pascua; Atlántico: Islandia, Azores; Índico: Crozet, San Paul y Ámsterdam, entre otros), la definición de qué constituye fondo oceánico y cómo clasificar una dorsal oceánica perturbada por la acción magmática en la interpretación del Art. 76, es el desafío a resolver por la Comisión. Se discuten los casos que han sido fallados por CLCS y la compleja relación entre argumentos científicos y legales que es necesario tener en consideración.

Descargo de Responsabilidad: Las aseveraciones efectuadas por el autor de este trabajo son de su exclusiva responsabilidad y no representan en lo absoluto la posición oficial de la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de Naciones Unidas.

Palabras Clave: CLCS, Plataforma continental, Dorsales oceánicas, Hotspot.

Influencia de las características del fondo lacustre en la variación superficial de glaciares en Campos de Hielo Sur

Diego Zamorano¹, Rodrigo Fernández¹, Andrés Rivera²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Portugal 84, Santiago, Chile

La geomorfología y sismo-estratigrafía de lagos proglaciales se ha convertido en una poderosa herramienta para el estudio de la dinámica actual y pasada de glaciares desprendentes (*calving glaciers*). Los mecanismos que controlan la pérdida de masa en este tipo de glaciares, aún no está bien comprendidos ni cuantificados, pues además de la forzante climática, diversos estudios apuntan a la relevancia de primer orden que tendrían los factores geomorfológicos y sedimentarios del ambiente glaciolacustre o glaciomarino, como por ejemplo, la geometría y constitución del lecho rocoso (sedimentario o rocoso), la formación de bancos morrénicos, y las tasas de sedimentación cerca de la línea de anclaje ("grounding line"). Estos factores condicionan la dinámica glacial al punto de que esta puede llegar a desacoplarse de la forzante climática en el corto y mediano plazo, como se ha planteado en la hipótesis del ciclo de glaciares desprendentes (Pfeffer W., 2007; Porter et al., 2014).

Los lagos proglaciales actúan como trampas sedimentarias para el material erosionado y transportado por los glaciares desprendentes, construyendo el complejo ambiente sedimentario glaciolacustre caracterizado por facies sedimentarias relacionadas a las dinámicas de avance, estabilidad y retroceso de los glaciares que aportan sedimentos. Estas facies pueden ser preservadas y estudiadas mediante métodos geofísicos como la sísmica de reflexión y la batimetría, actuando como una ventana al pasado de la dinámica glacial.

En este trabajo analiza una completa red de perfiles sísmicos realizados en el sector occidental del lago Viedma mediante sísmica de reflexión de baja frecuencia (300 - 400 Hz) y batimetría por ecosonda, recolectados en campañas realizadas entre el 2014 y 2017 en el marco del proyecto FONDECYT 1171832. Estos perfiles permitieron visualizar e interpretar el registro sedimentario al interior del lago, en una zona que estaba completamente cubierta por el glaciar Viedma hace 1500 a 2000 años (Le Roy et al., 2019; Zamorano, 2020).

Esto permitió determinar que la dinámica del glaciar Viedma con posterioridad al retroceso inicial, estuvo marcada por largos períodos de estabilidad y avances evidenciados por al menos 6 bancos morrénicos sumergidos cuyo volumen decrece hacia la parte proximal del glaciar hasta la zona ocupada en los años '80s, mostrando una transición hacia un ambiente de rápido retroceso dominado por flujos gravitacionales y una sedimentación de facies caóticas que rápidamente ocupó el espacio dejado por el glaciar en su retroceso. Este cambio en la dinámica glacial coincide con la profundización de la cuenca del lago Viedma, alcanzando profundidades superiores a los 700 m, lo que habría gatillado el rápido retroceso del glaciar Viedma observado durante los últimos 22 años debido al aumento de la tasa de desprendimiento del frente glacial en aguas profundas, situación que también se observó en el glaciar O'Higgins y en el glaciar Upsala, que presentan profundidades máximas de 830 m y 600 m respectivamente.

La interpretación sísmica permitió generar modelos de batimetría y de espesor y volumen de sedimentos acumulados, de lo que se derivó una tasa de erosión mínima para la cuenca del glaciar Viedma de $0,27 \pm 0,05$ mm/a en los últimos 150 años. Esto constituye una de las tasas de erosión más bajas de las que se han reportado en Campos de Hielo Sur (Fernández et al., 2016), lo cual se explicaría por las menores velocidades de flujo del glaciar Viedma (Sakakibara & Sugiyama, 2014), junto con características geológicas de la cuenca, como la geometría y litología del basamento rocoso con alta resistencia a la erosión.

Estos resultados permiten establecer que la variación en la posición del frente está en parte controlada por la morfología del fondo, en particular, la profundidad del lago Viedma. La formación de depósitos de bancos morrénicos en el frente del glaciar podría ser un factor estabilizador de la dinámica superficial aun cuando las tasas de flujo sedimentario que se deducen son relativamente bajas.

Palabras Clave: Geología glacial, Viedma, Sísmica de reflexión, Campos de hielo sur, Ambiente lacustre.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT Regular N°1171832.

Agradecimientos: Al Centro de Estudios Científicos (CECs), Jonathan Oberreuter, Jorge Lenz de Parques Nacionales de Argentina y a Luis Lenzano y María Gabriela Lenzano de IANIGLA.

Referencias:

- Fernández, R. A., Anderson, J. B., Wellner, J. S., Minzoni, R. L., Hallet, B., & Smith, R. T. (2016). Latitudinal variation in glacial erosion rates from Patagonia and the Antarctic Peninsula (46 S–65 S). *Bulletin*, 128(5-6), 1000-1023.
- Le Roy, M., Ruiz, L., Schimmelpenninck, I., Geiger, A., Villalba, R., Zorzut, V., Ponce, J. F., Deline, P., ASTER Team, Xu, S. & Fabel, D. (2019). Neoglacial fluctuations of two contrasting Southern Patagonian Icefield glaciers (49°S). *INQUA*, Ireland.
- Pfeffer, W. (2007). A simple mechanism for irreversible tidewater glacier retreat, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112 (F3).
- Porter, D. F., Tinto, K. J., Boghosian, A., Cochran, J. R., Bell, R. E., Manizade, S. S., & Sonntag, J. G. (2014). Bathymetric control of tidewater glacier mass loss in northwest Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 40-46.
- Sakakibara, D., y Sugiyama, S. (2014). Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. *Journal of Geophysical Research: earth surface*, 119(11), 2541-2554.
- Zamorano, D. (2020). Influencia geológica en la dinámica de los glaciares O'Higgins, Viedma y Upsala en Campo de Hielo Patagónico Sur. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.

Petrogénesis de los basaltos alcalinos de la Isla Pingüino, Antártica: Evidencias de fuentes piroxeníticas en el manto

Ignacio Aguirre¹, Javier Reyes¹, Luis E. Lara²⁻³

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Ingeniería y Tecnología

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias

(3) CKELAR Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico

La isla Pingüino pertenece al archipiélago de las Islas Shetland del Sur ubicado entre el Paso de Drake y la Península Antártica. Se enmarca en un complejo marco geodinámico, caracterizado por el fin de la subducción de la placa de Fénix bajo la placa continental Antártica hace ~3,3 Ma y la apertura de la cuenca de Bransfield (Barker et al., 1991). La isla está constituida por tres unidades volcánicas: una plataforma basáltica, un cono de escorias y un maar. Dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar y liquenometría (Pánczyk y Nawrocki, 2011; Birkenmajer, 1980) establecen la edad de la isla en el Pleistoceno - Holoceno.

Nuevos análisis geoquímicos (ICP-OES/ICP-MS), permiten clasificar a los magmas generados en la Isla Pingüino como basaltos ligeramente alcalinos. Las unidades volcánicas se caracterizan por tener bajas concentraciones de SiO₂, altas de MgO, Cr y Ni con altas razones de La/Yb, La/Sm y Ce/Y, y bajos valores de HREE que se relacionan con la presencia de granate residual en la fuente del manto. Lo anterior introduce un problema, ya que el granate se estabiliza en una peridotita a profundidades mayores a 80 km (Davidson et al., 2013), por lo general en condiciones de corteza gruesa. Esto es contrario a lo que ocurre en la zona de estudio, caracterizada por un adelgazamiento de la corteza producto de la apertura regional del rift de Bransfield. El contenido de CaO relativo al MgO en las lavas es coherente con la presencia de piroxenitas en la fuente, lo que concilia la presencia de granate con condiciones más someras de fusión ya que esta litología puede estabilizarlo a presiones más bajas (~ 19 kbar) que una peridotita (> 30 kbar) (Kogiso et al., 2003; Lambart et al., 2016). Además, las rocas tienen un notable enriquecimiento en LILE sobre HFSE y REE, junto a anomalías geoquímicas propias del proceso de subducción, probablemente como herencia del proceso de flux melting continuo durante toda la actividad del arco de las Islas Shetland del Sur.

La composición de la isla Pingüino es un ejemplo particular de magmatismo posterior a la existencia de un arco activo, cuya fuente del manto podría corresponder a bolsones de piroxenitas que se mezclan con peridotitas de espinela en un manto tipo marmolado, sometido a bajos grados de fusión parcial, con un mayor aporte al fundido de la piroxenita de granate, evidenciado principalmente en la ligera alcalinidad del magma y en los altos valores de Al₂O₃, CaO, Cr, y Zr.

Palabras Clave: Isla Pingüino, Basaltos alcalinos, Piroxenitas, Antártica, Petrogénesis.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el proyecto INACH Regular RT-56-18.

Referencias:

- Barker, P. (1991). Tectonic development of the Scotia Arc region. *Geology of Antarctica*, 6, 215-248.
- Birkenmajer, K. (1980). Age of the Penguin Island Volcano, South Shetland Islands (West Antarctica), by the lichenometric method. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 27, 69-76.
- Davidson, J., Turner, S. and Plank, T. (2013). Dy/Dy*: variations arising from mantle sources and petrogenetic processes. *Journal of Petrology*, 54(3), 525-537.
- Herzberg, C. (2006). Petrology and thermal structure of the Hawaiian plume from Mauna Kea volcano. *Nature*, 444(7119), 605-609.
- Kogiso, T., Hirschmann, M., and Frost, D. (2003). High-pressure partial melting of garnet pyroxenite: Possible mafic lithologies in the source of ocean Island basalts: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 216, p. 603-617.
- Lambart, S., Baker, M., and Stöpler, E. (2016). The role of pyroxenite in basalt genesis: Melt-PX, a melting parameterization for mantle pyroxenites between 0.9 and 5GPa: *Journal of Geophysical Research*, v. 121, p. 5708-5735.
- Pańczyk, M. and Nawrocki, J. (2011). Pliocene age of the oldest basaltic rocks of Penguin Island (South Shetland Islands, northern Antarctic Peninsula). *Geological Quarterly*, 55, 335-344.

Tectonic evolution of the Ellsworth Mountains: insights from detrital zircon (U-Th)/He analyses

Joaquín Bastías¹⁻², David Chew¹, Fernando Poblete³, Paula Castillo⁴, William Guenther⁵, Cristóbal Ramírez de Arellano⁶

(1) Trinity College Dublin, Department of Geology, Dublin, Ireland

(2) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(4) Westfälische Wilhelms-Universität, Institut für Geologie und Paläontologie, Münster, Germany

(5) University of Illinois Urbana-Champaign, Department of Geology, Urbana, USA

(6) Universidad Andrés Bello, Carrera Geología, Santiago, Chile

Introduction

The Ellsworth Mountains extend for ~350 km long and 50 km wide between the Transantarctic Mountains and the Antarctic Peninsula. They are located within West Antarctica, which is composed of crustal blocks that amalgamated in the Pacific margin of Gondwana during the late Precambrian – middle Phanerozoic (Jordan et al., 2020). Furthermore, the Ellsworth Mountains is the most isolated and enigmatic crustal block in West Antarctica. Their exposures are constrained by a series of nunataks and mountains and although the Antarctic icecap is intensively developed on these latitudes, they display an extensive sedimentary record that expands the early Cambrian to the Permian. Several studies have assessed the geological evolution of the Ellsworth Mountains along with its paleogeographic significance (e.g. Castillo et al., 2017 and references therein). Although it has been suggested that these mountains originated in the paleo-Pacific margin of Gondwana, between southern Antarctic and Africa; it has been also suggested that they were formed in a back-arc extensional setting or rifting (Curtis, 2001). Castillo et al. (2017), on the basis of provenance studies, suggested that the Ellsworth Mountains are likely part of the Australian-Antarctic plate, rather than the southern sector of Africa.

While a few studies have focused on determining the origin and tectonic setting of the Ellsworth Mountains, the evolution of its landscape is poorly constrained. Nevertheless, to overcome this we present new zircon (U-Th)/He data to better understand its thermal history and hence the formation of its present-day landscape.

The Ellsworth Mountains

The Ellsworth Mountains hosts a stratigraphic sequence that spans the Palaeozoic era throughout ~13 km of sedimentary succession (e.g. Castillo et al., 2017). At the base of the sequence is the lower Palaeozoic Heritage Group, which consist of ~7.5 km of exposures that are almost exclusively present in the Heritage Range. They consist of sedimentary and volcanic rocks that were deposited in a subsiding basin (Curtis and Lomas, 1999). The group is composed, from base to top, by the Union Glacier, Hyde Glacier, Drake Icefall, and Conglomerate Ridge formations. Overlying the Heritage Group is the Crashsite Group, a 7.5 km-thick sequence dominated by quartzite, argillite conglomerate, limestone, and basic igneous rocks (Goldstrand et al., 1994). This sequence is constrained from bottom to top by the Howard Nunataks, Mount Liptak, and Mount Wyatt Earp formations, which were deposited in a shallow-marine to fluviatile environment (Curtis and Lomas, 1999). Furthermore, the age of the Crashsite Group has been constrained to the late Cambrian–Devonian by trilobite fauna, sedimentation rates and detrital zircon ages (e.g. Shergold and Webers, 1992). The Crashsite Group is conformably overlain by the Whiteout Conglomerate. These rocks are dominated by late Carboniferous to early Permian grey to black diamictites (Matsch and Ojakangas, 1992). Overlaying the Whiteout Conglomerate are the argillites, siltstone, sandstone and coal of the Polarstar Formation (Collinson et al., 1992). Detrital zircon geochronology suggests that this unit was deposited throughout most of the Permian (Elliot et al., 2016).

Results and discussions

Selected samples from the Heritage Group yielded Jurassic and Cretaceous ZHe ages, which range between ~180 and 103 Ma. These results were obtained from the middle to late Cambrian Union Glacier, the middle to upper Cambrian Springer Break and the middle to upper Liberty Hill formations; which constrain in combination from the base to the top of the Heritage Group. ZHe ages obtained from the Permian-Carboniferous Whiteout Conglomerate yield ~182 and 159 Ma along with non-reset ZHe ages. These results suggest that the Heritage Group underwent pre-Jurassic burial and Jurassic-Cretaceous uplift. While the dataset from the Whiteout Conglomerate also suggests a pre-Jurassic burial and Jurassic-Cretaceous uplift, this part of the sequence was probably buried on the boundaries of the ZHe partial retention zone, which accounts for the non-reset ZHe ages. Nevertheless, the Jurassic-Cretaceous uplift of the sequence is contemporaneous with the translation and rotation of the Ellsworth Mountains within West Antarctica during the disassembly of Gondwana (Grunow et al., 1984; Dalziel et al., 2013). Finally, these results suggest that the formation of the Ellsworth Mountains pre-dates the Transantarctic Mountains, which were formed after the Jurassic.

Keywords: Antarctica, Thermochronology, Zircon, Gondwana.

Financing: This study is financed by the project RT-4418, funded by the Chilean Antarctic Institute. JB was funded by the Swiss National Science Foundation (project P500PN_202847).

Acknowledgments: The authors are grateful for the extensive logistical support provided by the Instituto Antártico Chileno (INACH) during two field campaigns to the Ellsworth Mountains.

References

- Castillo et al. 2017. Provenance and age constraints of Paleozoic siliciclastic rocks from the Ellsworth Mountains in West Antarctica, as determined by detrital zircon geochronology. *GSA Bulletin*, 129(11-12), 1568-1584.

- Collinson et al. 1992. in Webers et al., eds., *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctica*: Geological Society of America Memoir 170, 63–79.
- Curtis et al. 1999. Late Cambrian stratigraphy of the Heritage Range, Ellsworth Mountains: Implications for basin evolution: *Antarctic Science* 11, 63–77.
- Curtis, M.L. 2001. Tectonic history of the Ellsworth Mountains, West Antarctica: Reconciling a Gondwana enigma: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, no. 7, p. 939–958.
- Dalziel et al. 2013. The Scotia Arc: genesis, evolution, global significance. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41, 767–793.
- Elliot et al. 2016. The Gondwana plate margin in the Weddell Sea sector: Zircon geochronology of Upper Paleozoic (mainly Permian) strata from the Ellsworth Mountains and eastern Ellsworth Land, Antarctica: *Gondwana Research* 29, 234–247.
- Goldstrand et al. 1994. Stratigraphic evidence for the Ross orogeny in the Ellsworth Mountains, West Antarctica: Implication for the evolution of the paleo-Pacific margin of Gondwana: *Geology* 22, 427–430.
- Grunow et al. 1987. Mesozoic evolution of West Antarctica and the Weddell Sea Basin: New paleomagnetic constraints: *Earth and Planetary Science Letters* 86, 16–26.
- Jordan et al. 2020. The geological history and evolution of West Antarctica. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 117–133.
- Matsch et al. 1992. in Webers, G.F., Craddock, C., and Spletstoesser, J.F., eds., *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctica*: Geological Society of America.
- Shergold et al. 1992. in Webers, G.F., Craddock, C., and Spletstoesser, J.F., eds., *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctica*: Geological Society of America Memoir 170, 125–168.

Monitoring Calving at Perito Moreno Glacier (Southern Patagonian Icefield) by Combining Seismic Data and Camera Time-Lapse Imagery

Leoncio Cabrera Castro¹, Edgardo Casanova², Rogelio Torres¹⁻², Gino Casassa³⁻⁴, Sergio Ruiz¹, Douglas Wiens⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

(4) Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile

(5) Washington University in St. Louis, Department of Earth and Planetary Sciences, St. Louis, United States

Current climate changes are having large effects on the cryosphere. An example of this is the rapid mass loss of many glaciers around the world. One of the main processes that influences this is calving, or detachment of icebergs from the terminal fronts of glaciers in contact with a proglacial lake or the ocean. This process represents the most significant mass loss in tidewater glaciers in the world, including the Southern Patagonia Icefield. Calving monitoring is therefore essential. However, such monitoring is usually complicated due to difficult access in remote locations and limitations of temporal resolution. For these reasons, new and novel approaches and techniques are needed. In this work, we explore the monitoring of calving processes at the Perito Moreno Glacier located in the Southern Patagonia Icefield (Argentina), from November to December 2018. We combine synchronized continuous seismic records at a broadband station located less than one kilometer from the glacier front, along with time-lapse photography. In our preliminary results we report 88 seismically and photographically recorded events related to calving, which occurred at different locations on the glacier front. To characterize the site effect (where the station is located), frequency content, and similarity of events, we use the Horizontal to Vertical Noise Ratio (HVNR) method, spectrograms and temporal correlation matrices in different time windows. Our results indicate that the calving records have a high frequency content in the 1-5 Hz range for different time windows of the signal, in agreement with previous studies in other regions of the world. In addition, our analyses indicate that the site effect due to the location of the seismic station is outside the frequency range mentioned above, allowing a successful record of the events. Finally, from the correlation analysis of the seismic signals we show a great diversity of events, suggesting a highly complex process of breaking, sliding, and iceberg fall.

Keywords: Calving, Cryoseismology, Glaciers, Monitoring, Icequakes.

Financing: - Programa de Riesgo Sísmico (PRS) de la Universidad de Chile- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, FONDECYT 1200779- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, Beca Doctorado Nacional- US National Science Foundation (NSF).

Estratigrafía y dataciones de las rocas Neo-Proterozoicas y Paleozoicas de las Montañas Ellsworth en Antártica

Paula Castillo González¹, Fernando Poblete², Rodrigo Fernández², Joaquín Bastías³, Cristóbal Ramírez⁴, Mark Fanning⁵

(1) Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie, Münster, Alemania

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(3) The University of Dublin, Trinity College Dublin, Dublin, Irlanda

(4) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Santiago, Chile

(5) Australian National University, Research School of Earth Sciences, Canberra, Australia

Las Montañas Ellsworth se encuentran en la Antártida Occidental, en lo que se conoce como el bloque de las Montañas Ellsworth-Whitmore. Estas montañas están compuestas por rocas sedimentarias que se cree abarcan desde el Cámbrico temprano hasta el Pérmico. No se conoce ningún afloramiento de rocas que forme el basamento del bloque de las Montañas Ellsworth-Whitmore. Sin embargo, datos aeromagnéticos sugieren la presencia de una corteza proterozoica similar a la expuesta en Haag Nunataks, con rocas que tienen una edad aproximada de 1200-1050 Ma. Las reconstrucciones paleogeográficas del margen sur del paleo-Pacífico de Gondwana sitúan el bloque de las Montañas Ellsworth-Whitmore entre Sudáfrica y la Antártida, como parte de Gondwana Occidental, lo que se basa en una configuración de rift similar durante el Cámbrico en el sur de África, las Islas Falkland/Malvinas y las Montañas Ellsworth. Sin embargo, nuestros datos U-Pb en circones de rocas ígneas de la zona, junto con el análisis de los isótopos de O y Hf en dichos circones, indican la presencia de magmatismo en la zona en dos períodos diferentes: el Criogénico y el Cámbrico. La datación de circones en una microdiorita revela una edad de cristalización de c. 680 Ma, con valores positivos de ϵ_{Hf} inicial y valores de $\delta^{18}\text{O}$ similares a los de rocas del manto. Esto sugiere que el rift, que afectó la corteza mesoproterozoica, probablemente ocurrió durante el Criogénico y no durante el Cámbrico, como se creía hasta ahora. Un segundo evento magmático es registrado en el Cámbrico en los circones de una andesita basáltica con una datación de c. 515 Ma. Este magmatismo también está relacionado con un ambiente extensional, pero a diferencia de la microdiorita criogénica, los circones del Cámbrico presentan valores elevados de $\delta^{18}\text{O}$ que varían de 7.59 a 9.07 ‰, lo que indica una fuerte influencia sedimentaria en la fuente del magma y el reciclaje de la corteza. Nuestros datos respaldan firmemente una conexión del bloque de las Montañas Ellsworth-Whitmore con la Antártida Oriental (parte de Gondwana Oriental) antes de la amalgamación de Gondwana y sugieren que estaban vinculadas al rift Criogénico de Laurentia de Antártica-Australia para formar el Océano Paleo-Pacífico. Además, las composiciones isotópicas de oxígeno y hafnio en los circones detríticos de las rocas paleozoicas de las Montañas Ellsworth también respaldan esta conexión, indicando posibles fuentes en la Antártida Oriental. Por otro lado, el magmatismo del Cámbrico puede interpretarse como resultado de un escape tectónico posterior a la colisión de Antártida-Australia con Gondwana Occidental.

Palabras Clave: Circón, Cámbrico, Criogénico, Geología Isotópica.

Financiamiento: Proyecto INACH RT-44-18: Paleogeografía de la parte inferior del Grupo Heritage, Montañas Ellsworth, Antártica Occidental: Implicancias en las reconstrucciones de Gondwana.

New geochemical evidence from the Ellsworth-Whitmore Mountains and possible tectonomagmatic implications

Jaime Cataldo Bacho¹⁻³, Katja Deckart¹, Cristóbal Ramírez², Paula Castillo⁴, Rodrigo Fernández¹, Fernando Poblete¹, Joaquín Bastías⁶, Thomas Haber⁵, Alexey Ulianov⁷

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Ingeniería, Santiago, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Ingeniería, Viña del Mar, Chile

(4) Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie, 48149 Münster, Germany

(5) Universität Münster, Institut für Mineralogie, 48149 Münster, Germany

(6) Trinity College Dublin, Dublin, Ireland

(7) University of Lausanne, Institute of Earth Sciences, 1015 Lausanne, Switzerland

The Ellsworth-Whitmore Mountains (EWM) constitute a crustal block situated in the western sector of the Antarctic continent. This block is believed to have undergone independent rotation during the Gondwana breakup (Randall et al. 2000). The EWM includes a stratigraphic sequence with an approximate thickness of 13 km, spanning the entirety of the Paleozoic era from the Cambrian to the Permian (Webers et al., 1992; Curtis et al., 2001). Nonetheless, recent research by Castillo et al. (2017) has reported U-Pb ages of around 675 Ma in volcanoclastic rocks found at the base of the EWM stratigraphy. These findings suggest a Cryogenic age for the base of the EWM stratigraphy, implying active proximal volcanism during deposition.

The Heritage Group, forming the lower 7.5 km of the EWM stratigraphic column, comprises marine and continental facies, alongside lavas, stocks, sills, and dikes exhibiting gabbroic affinities. These features are interpreted as consequences of deposition within a rapidly subsiding environment. The age reported by Castillo et al. (2017) implies that the Heritage Group might have been deposited or initiated deposition within a distinct tectono-magmatic context compared to the Cambrian (Curtis et al. 2001; Dalziel, 2007), possibly linked to the intricate breakup of Rodinia. This contribution presents preliminary petrological and geochemical findings from hypabyssal rocks and lavas from the Union Glacier, Liberty Hills, Kosko Peak, and Springer Peak formations, all part of the Heritage Group. The aim is to decipher the tectono-magmatic context of this group.

The analyzed rock samples underwent whole-rock analysis using XRF, mineral microprobe analysis of clinopyroxenes, and trace element analysis using ICP-MS. These analyses were performed at the University of Münster and the University of Lausanne, respectively.

The mineralogy of the studied rocks is predominantly composed of clinopyroxene and plagioclase. Some samples also contain titanite, orthopyroxene, and ilmenite. Alteration in the rocks ranges from moderate to high, primarily affecting plagioclase, which is altered to sericite, calcite, and clay minerals. Pyroxenes display varying degrees of alteration, with some crystals showing incipient chloritization, while others exhibit moderate alteration to titanite and ilmenite with pseudomorphic characteristics.

Major element analyses indicate that rocks from the Heritage Group are classified as basalts and basaltic andesites in terms of chemical composition. The AFM diagram suggests that certain rocks follow a differentiation pattern resembling the tholeiitic series, while others exhibit affinity with the calc-alkaline series. Immobile trace element analyses (ThN vs NbN; N-MORB normalized; as per Saccani, 2015) indicate a mixed nature. Some rocks show affinities with magmatic arcs, while others share similarities with mid-ocean ridge basalts (MORB) or ocean island basalts (OIB).

Microprobe analyses of clinopyroxenes reveal variations between diopside and augite, following the classification by Morimoto et al. (1988). The Putirka geothermobarometer (2008) was employed to determine pyroxene formation conditions, yielding an average pressure of 6.1 +/- 3 kbar, suggesting depths ranging from approximately 10 to 30 km (assuming an average density of 3 g/cm³). The average estimated temperature is 1121 +/- 40 °C. These results suggest that magma crystallization occurred within the continental crust, possibly in a subduction or intraplate setting.

In summary, geochemical analyses of whole-rock and mineral samples suggest a complex tectono-magmatic evolution for the Heritage Group. These data may be interpreted as indicative of a transition between distinct tectonomagmatic environments (potentially aligning with a breakup tectono-magmatic context) or as an environment where petrogenetic processes facilitated the observed geochemical variability. Further discussion on geotectonic and paleogeographic implications will be presented.

Keywords: Ellsworth-Withmore Mountains (EWM), Heritage Group, Total rock and mineral geochemistry, Geothermobarometry

Financing: This research has been funded by the INACH_RT_44_18 project "Paleogeography of the lower Heritage Group, Ellsworth Mountains, Western Antarctica: Implications for Gondwanaland reconstructions".

Acknowledgments: A sincere feeling of gratefulness and appreciation to all the reviewers of the abstract and this work, for their constructive comments and insights have been of a great contribution.

References

- Castillo, P., Fanning, C. M., Fernández, R., Poblete, F., & Hervé, F. (2017). Provenance and age constraints of Paleozoic siliciclastic rocks from the Ellsworth Mountains in West Antarctica, as determined by detrital zircon geochronology. *GSA Bulletin*, 129(11-12), 1568-1584.
- Curtis, M.L., 2001, Tectonic history of the Ellsworth Mountains, West Antarctica: Reconciling a Gondwana enigma: Geological Society of America Bulletin, v. 113, no. 7, p. 939-958, [doi:10.1130/0016-7606\(2001\)113%3C0939:THOTEM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C0939:THOTEM%3E2.0.CO;2).

- Dalziel, I.W.D., 2007, The Ellsworth Mountains: Critical and enduringly enigmatic, in Cooper, A.K., and Raymond, C.R., eds., Antarctica: A Keystone in a Changing World: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1047, Short Research Paper 004, 5 p., [doi:10.3133/of2007-1047.srp004](https://doi.org/10.3133/of2007-1047.srp004).
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., ... & Gottardi, G. (1988). Nomenclature of pyroxenes. Mineralogical magazine, 52(367), 535-550.
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. Reviews in mineralogy and geochemistry, 69(1), 61-120.
- Randall, D.E., Curtis, M.L., and Millar, I.L. (2000). A new late middle Cambrian paleomagnetic pole for the Ellsworth Mountains, Antarctica: The Journal of Geology, v. 108, p. 403–425.
- Saccani, E. (2015). A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematics. Geoscience Frontiers, 6(4), 481-501.
- Webers, G.F., Bauer, R.L., Anderson, J.M., Buggisch, W., Ojakangas, R.W., and Spörl, K.B. (1992). The Heritage Group of the Ellsworth Mountains, West Antarctica, in Webers, G.F., Craddock, C., and Splettstoesser, J.F., eds., Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctica: Geological Society of America Memoir 170, p. 9–20.

Antarctic Ice sheet and glaciers: questions for future Chilean Antarctic Marine research

Rodrigo Fernández¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

One of the most important focuses of current research in Antarctica refers to the identification and evaluation of the main controls on the stability and likelihood of rapid retreat or collapse of the Antarctic Ice Sheet. As the technological tools advance and the global Antarctic research community is able to evaluate the effects of the different components of the complex Antarctic glacial system, the attention on the main controls of ice sheet stability has shifted towards the area surrounding the grounding line, both seaward, involving the stability of ice-shelves and the basal melting of ice due to the advection of warm sea water to the subglacial environment (e.g. ice-shelves, ice-streams, cavities), and landward, involving the geometry and bed conditions controlling basal drag, ice flux and ultimately, calving (Hogan et al., 2020; Rignot et al., 2019). Although important, the only places where comprehensive studies have been carried out to find out the main controls on ice sheet stability and their interactions are the Amundsen Sea, Ross Sea, and more recently the Sabrina Coast sectors of the Antarctic margin.

The inner shelf is characterized by a deep rugged sea floor, believed to be mostly bedrock, which transitions to a smoother and shallower middle and outer shelf characterized by a sedimentary substrate, forming a landward sloping continental shelf (Fernandez et al., 2018; MacKintosh et al., 2011; Wellner et al., 2006). This configuration of the continental shelf implies that during glacial advances, the margin of the Antarctic Ice Sheet would have flowed on a bed of changing downstream conditions, including decreasing rugosity, basal drag, and depth. This geomorphic and sedimentary conditions may have influenced the ice flux through the grounding line, and thus the dynamic mass balance changes, throughout the whole extension of the Antarctic Ice Sheet margin. However, areas where direct observations have been made are sparse and mostly focus on the larger glacial systems (e.g. Pine Island and Thwaites glaciers, Sabrina Coast, Ross Sea areas).

Another important topic of research has been the coupling between the ocean-climate changes and glacier variations, including the ice retreat following the last termination, as well as more recent generalized glacier retreat modulated by the observed atmospheric warming over the last decades. However, the understanding of the controls on glacier behavior is hampered by the complexity derived from paleo-environmental proxies and the questions remaining about past glacier dynamics (Allen et al., 2010; Minzoni et al., 2015). Part of the problem lies in the diachronous behavior of Antarctic glaciers under similar regional forcings, or the poor understanding of the influence of bed and grounding line conditions on ice flux, or the questions regarding the magnitude of past atmospheric- oceanic-influence on mass balance.

As the finishing of the construction and start date of operations of the new Chilean ice breaker research vessel approaches, questions arise about the opportunities for contribution of the Chilean Antarctic community research efforts to the answering of these questions. Recent advances on glacier variability and the stability of the Antarctic Ice sheet configure a promissory scenario for new research focused on the testing of several pressing hypotheses. Among them are the coupling between glacier behavior and climate and ocean changes during the Holocene, how Antarctic Peninsula glaciers reacted to global climate events such as the mid Holocene climatic optimum or the Little Ice Age, and the estimation of rates of grounding line retreat at different timescales. The use of newly available technological tools such as submarine and aerial ROVs, new geophysical approaches, and the possibility of detailed long-term monitoring should be considered as the basis for future advances. In this contribution I will review the latest research on ice sheet and glacier stability and behavior and propose areas of future research to promote the growth of the Chilean Antarctic Marine Geology community.

Keywords: Antarctic Marine Geology, Antarctic Ice-sheet, Antarctic Glaciers.

Financing: Proyecto INACH RT-44-18 Paleogeography of the lower Heritage Group, Ellsworth Mountains, Western Antarctica: Implications for Gondwanaland reconstructions.

References:

- Allen, C. S., Oakes-Fretwell, L., Anderson, J. B., & Hodgson, D. A. (2010). A record of Holocene glacial and oceanographic variability in Neny Fjord, Antarctic Peninsula. *Holocene*, 20(4), 551–564.
- Fernandez, R., Gulick, S., Domack, E., Montelli, A., Leventer, A., Shevenell, A., & Frederick, B. (2018). Past ice stream and ice sheet changes on the continental shelf off the Sabrina Coast, East Antarctica. *Geomorphology*, 317, 10–22.
- Hogan, K. A., Larter, R. D., Graham, A. G. C., Arthern, R., Kirkham, J. D., Totten Minzoni, R., Jordan, T. A., Clark, R., Fitzgerald, V., Wählin, A. K., Anderson, J. B., Hillenbrand, C. D., Nitsche, F. O., Simkins, L., Smith, J. A., Gohl, K., Erik Arndt, J., Hong, J., & Wellner, J. (2020). Revealing the former bed of Thwaites Glacier using sea-floor bathymetry: Implications for warm-water routing and bed controls on ice flow and buttressing. *Cryosphere*, 14(9), 2883–2908.
- MacKintosh, A., Golledge, N., Domack, E., Dunbar, R., Leventer, A., White, D., Pollard, D., Deconto, R., Fink, D., Zwartz, D., Gore, D., & Lavoie, C. (2011). Retreat of the East Antarctic ice sheet during the last glacial termination. *Nature Geoscience*, 4(3), 195–202.
- Minzoni, R. T., Anderson, J. B., Fernandez, R., & Wellner, J. S. (2015). Marine record of Holocene climate, ocean, and cryosphere interactions: Herbert Sound, James Ross Island, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, 129, 239–259.
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Van Den Broeke, M., Van Wessem, M. J., & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic ice sheet mass balance from 1979–2017. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 116, Issue 4, pp. 1095–1103). National Academy of Sciences.
- Wellner, J. S., Heroy, D. C., & Anderson, J. B. (2006). The death mask of the antarctic ice sheet: Comparison of glacial geomorphic features across the continental shelf. *Geomorphology*, 75(1-2 SPEC. ISS.), 157–171.

Magmatismo Paleógeno en la Península Antártica: registro geocronológico U-Pb y geoquímico de la Isla Doumer, Estrecho de Gerlache

Wuidad Jara Quesieh¹, Joaquín Bastías Silva¹⁻², Richard Spikings³

(1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Ejército Libertador 146, Santiago, Chile

(2) Trinity College Dublin, Department of Geology, College Green, Dublin 2, Ireland

(3) University of Geneva, Earth Science Department, 1205 Geneva, Geneva, Switzerland

La Península Antártica es un bloque cortical arqueado que pertenece a la Antártica Occidental, una región que desarrolló un margen activo a lo largo del borde de Gondwana a través de la subducción de la placa oceánica proto-Pacífica y el continente cratónico de Antártica Oriental (e.g. Riley et al., 2023). La Península Antártica conserva una historia geológica y tectónica desde el Ordovícico hasta la actualidad como un margen continental de acreción, que incluye eventos magmáticos bien conservados.

El propósito de esta investigación es comprender la conexión existente entre las rocas plutónicas de la Isla Doumer y el fin del magmatismo de arco en la zona de subducción de la Península Antártica. Asimismo, se busca desarrollar un modelo que explique la evolución magmática de esta región durante el periodo Paleógeno.

Si bien el registro del magmatismo Paleógeno es bastante escaso, la Isla Doumer contiene abundantes afloramientos de rocas ígneas, y en consecuencia es relevante para la caracterización del magmatismo Cenozoico de la Península Antártica. Es por esto que se realizaron estudios petrográficos de muestras obtenidas en los alrededores de la Base Yelcho, ubicada al sur de la Isla Doumer; además de estudios de análisis geocronológicos U-Pb en circones ígneos, usando el método de LA-ICP-MS con el objetivo de determinar la edad de las muestras; los que fueron complementados con estudios isotópicos de Lu-Hf para estudiar las fuentes que alimentaron los magmas que formaron estas rocas de Base Yelcho.

Los datos geocronológicos $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ realizados en circones en cuatro muestras de rocas ígneas ácidas intermedias arrojaron edades magmáticas Paleógenas entre los ~64 a ~54 Ma. La composición isotópica de Lu-Hf realizado en los circones de la muestra 15JB49 arrojaron valores positivos de ϵHf_t de 8,3 a 9,5 marcando una notoria afinidad de procedencia al manto empobrecido. Adicionalmente, las edades de Hf_{TDM} , es decir, la edad modelo del manto empobrecido varía entre ~290 a 220 Ma. Esto último indica una edad de extracción mantélica Pérmica-Triásica, así como también, un tiempo de residencia de la muestra en un reservorio de la corteza (Vervoort, 2014) de unos ~230 a 160 Ma. Durante el Pérmico, la Península Antártica formó un arco con magmatismo granitoide debido a la subducción, lo que condujo a un magmatismo dominado por reciclaje de corteza continental (Castillo et al., 2020; Jordan et al., 2020). Consecutivamente, durante el Triásico, hubo un cese de magmatismo por un abrupto hundimiento de la placa en subducción, seguido de su reanudación a los ~230 Ma, acompañado de eventos de deformación (Bastías et al., 2020; Riley et al., 2023). El periodo Jurásico se caracterizó por una alta actividad magmática, posiblemente relacionada con la reorganización de placas o actividad manto-pluma (Jordan et al., 2020), aunque Bastías et al., 2021 revisó este evento y sugirió que estaba principalmente relacionado al margen activo. Adicionalmente, se registró un significativo emplazamiento de granitoides (Riley et al., 2017). Durante el Cretácico, se desarrolló un intenso magmatismo de arco en la Península Antártica que también ha sido asociado a la reorganización global de placas (Jordan et al., 2020), con una importante adición de magma juvenil (Bastías et al., 2022). Esto sugiere en su conjunto, que las muestras presentes en Base Yelcho fueron formadas a partir de la mezcla de magmas derivados del manto empobrecido con magmas generados por el material cortical derivado de la subducción de la Península Antártica. En general, las rocas granodioríticas Cenozoicas de la Isla Doumer estarían relacionadas a un ambiente de subducción y en consecuencia la subducción, en su estado más tardío, generó magmas relativamente más juveniles. Adicionalmente, se sugiere que los magmas se alimentaron de distintos reservorios isotópicos durante el Mesozoico y Cenozoico en la Península Antártica.

Keywords: Península Antártica, Isla Doumer, Magmatismo, Paleógeno, Geocronología.

References

- Bastías, J., Spikings, R., ... Burton-Johnson, A. (2022). Cretaceous magmatism in the Antarctic Peninsula and its tectonic implications. *Journal of the Geological Society*, 180(1), 1–18. <https://doi.org/10.1144/jgs2022-067>.
- Bastías, J., Spikings, R., ... Hervé, F. (2021). A revised interpretation of the Chon Aike magmatic province: Active margin origin and implications for the opening of the Weddell Sea. *Lithos*, 386–387. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106013>.
- Bastías, J., Spikings, R., ... Bouvier, A. S. (2020). The Gondwanan margin in West Antarctica: Insights from Late Triassic magmatism of the Antarctic Peninsula. *Gondwana Research*, 81, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.10.018>.
- Castillo, P., Fanning, C. M., & Riley, T. R. (2020). Zircon O and Hf isotopic constraints on the genesis of Permian–Triassic magmatic and metamorphic rocks in the Antarctic Peninsula and correlations with Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104(August), 102848. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102848>.
- Jordan, T. A., Riley, T. R., & Siddoway, C. S. (2020). The geological history and evolution of West Antarctica. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(2), 117–133. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0013-6>.
- Riley, T. R., Burton-Johnson, A., ... Whitehouse, M. J. (2023). Palaeozoic – Early Mesozoic geological history of the Antarctic Peninsula and correlations with Patagonia: Kinematic reconstructions of the proto-Pacific margin of Gondwana. *Earth-Science Reviews*, 236(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104265>.
- Riley, T. R., Flowerdew, M. J., ... Whitehouse, M. J. (2017). Early Jurassic magmatism on the Antarctic Peninsula and potential correlation with the Subcordilleran plutonic belt of Patagonia. *Journal of the Geological Society*, 174(2), 365–376. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-053>.
- Vervoort, J. (2014). Encyclopedia of Scientific Dating Methods. *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, 1–20. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_6326-5.

Relief Creator: Una herramienta de código abierto para editar y crear PaleoDEMs

Álvarez Sergio², Nancy Hitschfeld², **Fernando Poblete**¹, Matías Toro², Ignacio Santos²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 851, Santiago, Chile

La paleotopografía terrestre y la paleoposición de las masas continentales son el resultado de la interacción entre las placas tectónicas, el clima y la convección del manto. Su evolución en el tiempo —ubicación y elevación— ejercen un control mayor en el flujo de corrientes oceánicas, la circulación atmosférica, y en la creación/destrucción de barreras orográficas para la dispersión de fauna. Por lo tanto, la elaboración de mapas paleotopográficos, también llamados PaleoDEMs, que muestran la paleoposición de los continentes y las paleoelevaciones, son condiciones de borde para los estudios de paleoclima, geodinámica y evolución de la biota. En la actualidad, diferentes alternativas ofrecen la funcionalidad de modificar las alturas almacenadas dentro de un paleoDEM, utilizando como punto de partida una topografía global trasladada a una edad determinada mediante un software dedicado, cómo es el caso de Gplates. Sin embargo, estas alternativas se basan en softwares pagados, requieren conocimientos de programación o de software SIG o carecen de una interfaz gráfica de usuario, lo que dificulta o restringe su adopción por parte de investigadores.

En esta contribución, presentamos Relief Creator (RC), un software multiplataforma y de código abierto especializado en la creación de paleoDEMs o la modificación de los ya disponibles en la literatura. RC cuenta con una interfaz gráfica intuitiva que permite al usuario combinar diferentes paleoDEMs y modificar elevaciones, entre otras funcionalidades, y exportarlos como un archivo binario NetCDF que permite almacenar datos científicos multidimensionales. Hemos diseñado el software con el fin de que pueda ser fácilmente extensible a nuevas funcionalidades según se requiera. Adicionalmente, se está desarrollando una versión web gráfica e interactiva que permita la visualización y edición de mapas paleogeográficos en línea. Esto fomentará el trabajo colaborativo entre diferentes usuarios; que puedan agregar, compartir y editar mapas en la plataforma, los que podrán ser visualizados y discutidos por la comunidad de geocientíficos.

Nuestro software, y su versión web, en desarrollo, dedicados a la construcción de nuevos paleoDEMs, desarrollados en una plataforma amigable y de código abierto, permitirá a los científicos interesados en el desarrollo de mapas paleogeográficos proporcionar a la comunidad científica nuevos paleoDEMs que integren los últimos avances en esta disciplina. El software, al ser de uso libre del software y no requerir conocimientos técnicos avanzados promoverá la colaboración entre los investigadores que trabajen en reconstrucciones paleogeográficas.

Palabras Clave: Paleogeografía, PaleoDEM, Software Libre.

Financiamiento: Esta contribución ha sido financiada por los proyectos RT-44-18 del Instituto Antártico Chileno (INACH) y los proyectos FONDECYT 1211484, 1181506 y 1231211 de ANID.

Progradación y retroceso de playas formadas por desechos mineros en el litoral del Desierto de Atacama

Germán Aguilar Martorell¹, Paloma Ojeda Fuentes¹⁻², Paloma Lazo Paredes¹⁻³, Camila Arróspide Vásquez¹⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Avenida Tupper 2007, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería y Geología, Avenida Copayapu 485, Copiapó, Chile

(4) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La acumulación de desechos de la minería en el litoral de Chañaral es un caso emblemático de intervención antrópica a nivel mundial. Entre 1938 y 1990 se usaron dos puntos para descargar 350 millones de toneladas de desechos mineros. Entre 1938 y 1975 los desechos fueron vertidos al río Salado y depositados en su desembocadura localizada al sur de la bahía de Chañaral. Entre 1975 y 1990 la descarga del desecho minero se trasladó 12 kilómetros al norte por un canal a Caleta Palito, fuera del radio de la bahía de Chañaral. En resumen, se produjo una progradación artificial de playas durante los periodos de descarga de los desechos mineros. Este trabajo cuantifica la progradación y retroceso de estas playas artificiales, midiendo variaciones en la posición de la línea de costa en la última década. Las variaciones son medidas en 89 transectas a lo largo del litoral, procesando imágenes satelitales de Google Earth Engine con el software CoastSat.

En el segmento sur de la Bahía de Chañaral, donde se encuentra la desembocadura del río Salado, la playa Grande progresa a tasas promedio de 1,5 m/año. La máxima tasa de progradación de 5 m/año se registra en transectas ubicadas en la posición de las bermas del canal fluvial, generado por la incisión durante los aluviones de marzo de 2015 y mayo de 2017. La progradación se explica por las altas tasas de sedimentación, en respuesta al desarrollo de espacio de acomodación por la incisión del canal y la gran disponibilidad de sedimentos después de ocurridos los aluviones. Cabe destacar que el retroceso puntual de la playa fue de hasta 230 m, generado por la incisión del canal durante el aluvión de marzo de 2015.

En el segmento central de la bahía de Chañaral, la playa Grande retrocede en promedio a tasas de - 5,5 m, ligada a la erosión por la acción mecánica del oleaje sobre los depósitos de desechos mineros. La tasa de retroceso máxima de -10,7 m/año se registra en una transecta localizada al centro de la bahía; hacia el norte de la bahía, el retroceso promedio es de sólo -3,9 m/año (-6,4 m/año medido como máximo retroceso en una de las transectas). Las tasas más bajas de retroceso, en relación con el segmento central, se explican ya que estas tasas ponderan periodos de progradación por avance de dunas en las estaciones de verano, depósitos eólicos formado en el segmento norte de la playa Grande, compuesto por arenas seleccionadas desde los depósitos de desechos mineros y distribuido por el viento.

En la bahía que se localiza al norte de Caleta Palito, la descarga de desechos mineros formó dos nuevas playas sobre una costa antes rocosa: El Refugio y Los Amarillos. Las tasas de retroceso promedio son de -3,8 m/año y -1,2 m/año en El Refugio y Los Amarillos, respectivamente. La máxima tasa de retroceso de -6,6 m/año se registra en una transecta de El Refugio, en donde todas las transectas registran retroceso de playas, a diferencia de lo que se observa en Los Amarillos y en la playa Grande de la Bahía de Chañaral. El Refugio y Los Amarillos están formadas por arenas de desechos mineros transferidas y seleccionadas por la deriva litoral desde Caleta Palito. El retroceso se relaciona al desequilibrio de estas playas artificiales, formadas en una costa que antes de la descarga de desechos mineros era rocosa. En particular, la Playa El Refugio está en un estado transiente hacia su desaparición y reconfiguración de una costa rocosa.

Los resultados muestran tasas de progradación y retroceso de playas que cambian a lo largo del litoral y en el tiempo. Estas variaciones están ligadas a la génesis antrópica de estas playas y a procesos aluviales desarrollados en la desembocadura del río Salado. Las variaciones observadas involucran una compleja red de procesos y factores, tanto permanentes, como la erosión producto de la acción mecánica del oleaje modulado por el régimen de mareas, así como efímeros, relacionados a tormentas que gatillan la ocurrencia de aluviones. Además, la dinámica geomorfológica es el resultado de una dramática intervención antrópica. Los resultados indican que, para relacionar cambios oceanográficos a escala de cuencas oceánicas en el litoral de Atacama con medidas de progradación y retroceso de playas, se debe aislar los efectos particulares de la dinámica fluvial en las playas localizadas en la desembocadura de las grandes cuencas andinas, así como considerar las dramáticas intervenciones antrópicas de las playas.

Palabras Clave: Desechos mineros, Playas artificiales, Línea de costa, Progradación y retroceso, Litoral de Atacama.

Financiamiento: FONDECYT N° 1221274: Data and physically consistent characterization of coastal changes via machine learning techniques: human-induced changes on near-shore sediment system in an arid rocky coast.

¿Qué significa “formalizar” el Antropoceno? Implicaciones para el Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno de la Comisión Internacional de Estratigrafía

Hernán Bobadilla¹

(1) Politecnico di Milano, Departamento de Matemáticas, La Nave, Via Edoardo Bonardi 9, Milano, Italia

1. Introducción

Crutzen y Stoermer (2000) propusieron utilizar el término “Antropoceno” para referirse a la época geológica en curso, en reconocimiento del impacto de las actividades humanas sobre las dinámicas terrestres. Este impacto ha sido bien documentado en un vasto número de publicaciones científicas, incluyendo los reportes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Sin embargo, la mayor parte de este impacto ha sido registrado en la atmósfera, hidrósfera, biósfera, criósfera, pedósfera, y sus interfaces. En particular, la evidencia del impacto humano en la litósfera es menos conclusiva. Este es precisamente el dilema: es en el dominio litosférico donde las épocas geológicas se han formalizado tradicionalmente, basadas en evidencia estratigráfica.

La Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) es ampliamente reconocida como el árbitro internacional para definiciones de unidades geocronológicas basadas en unidades cronoestratigráficas. Para ser formalizado, el Antropoceno debiese pasar por el procedimiento estándar de sección y punto de estratotipo de límite global (GSSP), estableciendo su límite inferior según una señal estratigráfica biótica o física de alcance global. El organismo encargado de recolectar evidencia para este propósito es el Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno (AWG), cuya postura oficial es: 1) el Antropoceno debe ser tratado como una unidad cronoestratigráfica formal; y 2) su base debe establecerse según una señal estratigráfica de mediados del siglo XX. La formalización del Antropoceno por parte de la ICS aún está pendiente y su rechazo es un escenario factible.

En este artículo, investigo algunos de los desafíos en la formalización del Antropoceno. Procedo en tres pasos. Primero, distingo dos sentidos de formalización: el descriptivo y el evaluativo. Segundo, discuto el status del Antropoceno más allá de la ICS. Tercero, analizo posturas críticas respecto de dos argumentos a favor de la formalización del Antropoceno en el contexto de la ICS.

2. Formalizaciones descriptivas y evaluativas

En este trabajo, introduzco una distinción entre dos sentidos en los que un concepto puede ser formalizado. El primero es el *descriptivo*: Formalizar un concepto significa articularlo de forma explícita y rigurosa. En el caso del Antropoceno, su formalización descriptiva consiste en articularlo, explicitando su inicio basado en evidencia estratigráfica rigurosa. El propósito central de la formalización descriptiva es la claridad: La formalización permite evitar ambigüedades y errores comunicacionales, promoviendo así una investigación científica más precisa y eficiente. Cabe mencionar que no existe una sola métrica para medir la claridad con la cual un concepto es articulado. Por lo mismo, las formalizaciones descriptivas pueden ser alcanzadas mediante diversas articulaciones, haciendo de la elección adecuada un asunto contextual.

El segundo sentido del término “formalizar” es *evaluativo*: Formalizar un concepto significa dotarlo de legitimidad mediante apoyo institucional. Esto hace de la formalización evaluativa una noción intrínsecamente contextual: Distintas instituciones pueden tener posturas distintas respecto de un concepto. La formalización evaluativa del Antropoceno consiste en adoptar el término “Antropoceno” para referirse al tiempo geológico en curso, reconociéndose como condicionado por las actividades humanas. En la práctica, esto implica admitir y promover el uso del término “Antropoceno” en artículos científicos, en comunicaciones oficiales, en nombres de instituciones, etc. En su sentido evaluativo, formalizar un concepto contribuye a su estandarización: El apoyo institucional a un concepto provee terminologías y prácticas comunes para las instituciones adherentes. La estandarización cumple así un valioso rol comunicativo, contribuyendo a intercambios más eficientes y precisos en investigación científica.

Estos dos sentidos del término “formalizar” son conceptualmente distintos y, en principio, independientes. Es decir, el apoyo institucional a un concepto no implica que éste esté articulado de forma explícita y rigurosa, y el hecho de que un concepto posea una articulación explícita y rigurosa no implica que instituciones específicas deban otorgar su apoyo. Sin embargo, en la práctica, estos dos sentidos suelen concurrir. Por un lado, articulaciones explícitas y rigurosas de un concepto incentivan a que instituciones promuevan su uso, dadas las valiosas ventajas comunicacionales e investigativas que esto proporciona. Por otro lado, instituciones que apoyan el uso de ciertos conceptos, por propósitos de estandarización, suelen involucrarse en esfuerzos para elucidar dichos conceptos.

En particular, tanto consideraciones descriptivas como evaluativas son evidentes en el diseño de las preguntas para el voto vinculante del AWG en 2019 respecto de la formalización del Antropoceno. La primera pregunta fue: ¿Debiese el Antropoceno ser tratado como una unidad cronoestratigráfica formal definida por un GSSP? Esta pregunta plantea si acaso el AWG debiese apoyar la adhesión formal del Antropoceno, independiente de su articulación específica. En dicho sentido, esta pregunta aborda una dimensión estrictamente evaluativa. La segunda pregunta fue: ¿Debería ser la guía principal para la base del Antropoceno una de las señales estratigráficas alrededor de mediados del siglo XX? Esta segunda pregunta plantea una articulación explícita del inicio del Antropoceno, reflejando así un interés de formalidad descriptiva. A pesar de que las dos preguntas son en principio independientes, es revelador notar que ambas preguntas recibieron el mismo número de votos a favor: 29 de 33. Esto refleja que, a pesar de su independencia conceptual, ambos sentidos de formalización suelen estar asociados en la práctica.

3. El Antropoceno más allá de la ICS

El término “Antropoceno” es un concepto formal – en su sentido evaluativo – respaldado en varias disciplinas científicas, incluyendo

las ciencias del sistema terrestre, ecología, oceanografía, economía y antropología. Sin embargo, no es claro que lo que se respalde sea una única articulación del Antropoceno, explícita y rigurosa. Más bien, lo que se respalda es una noción general, común a todos los usos del término, arraigada en su etimología: que el tiempo presente está condicionado por actividades humanas que afectan las dinámicas terrestres. Esta noción general no es controvertida (e.g., “es inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra”; IPCC 2021, AR6-WGI). Lo controversial es cómo formalizar descriptivamente el Antropoceno, i.e., cómo articular esta noción general de manera explícita y rigurosa. Concediendo que la noción general del Antropoceno es evaluativamente formal en múltiples contextos, procedo a abordar su formalidad descriptiva.

Ha habido varias propuestas para articular el Antropoceno, cada una de las cuales establece un inicio basado en evidencia estratigráfica. A modo de ilustración, Lewis y Maslin (2015) compilan nueve posibles inicios para el Antropoceno, en función de diferentes eventos, por ejemplo: 5020 años antes del presente (comienzo de la producción de arroz), 1610 (colonialismo europeo en las Américas) y 1964 (gran aceleración). Estas propuestas varían en la evidencia que utilizan, por ejemplo: la inflexión de CH₄ en hielos glaciares, el punto bajo de CO₂ en hielos glaciares, y radionúclidos de ¹⁴C en anillos de árboles. No es mi intención discutir los méritos específicos de estas y otras propuestas, sino simplemente mostrar que la formalidad descriptiva es compatible con una pluralidad de articulaciones. Es decir, un mismo concepto puede articularse explícita y rigurosamente de múltiples maneras, cada una de las cuales satisface el objetivo epistémico de la claridad. El hecho de que no haya consenso respecto del respaldo a una determinada articulación es un problema de estandarización, i.e., una cuestión de formalización evaluativa. Como corolario, la formalización descriptiva no es necesariamente un camino hacia la estandarización.

Esta última lección es importante, dado que la estandarización es uno de los principales objetivos de la ICS. En particular, la guía estratigráfica de la ICS se propone promover un acuerdo internacional sobre los principios de clasificación estratigráfica y desarrollar una terminología y reglas de procedimiento aceptables, en aras de mejorar la exactitud y precisión en la comunicación, coordinación, y comprensión entre naciones. Estos loables propósitos promueven la formalización de unidades cronoestratigráficas y sus asociadas unidades geocronológicas. Sin embargo, las unidades geocronológicas son de interés científico en disciplinas fuera de la estratigrafía. Por lo tanto, es crucial dilucidar el alcance de la estandarización que se derivaría de una potencial formalización del Antropoceno por parte de la ICS.

El AWG ha enfatizado que su mandato no debe concebirse como un intento por forzar la estandarización interdisciplinaria. Su tarea principal es identificar y evaluar la evidencia geológica que justifica la formalización del Antropoceno en la estratigrafía. Esto deja espacio para que otras disciplinas formalicen descriptivamente el Antropoceno en formas no estratigráficas. Sin embargo, el AWG también pretende explicar la utilidad de la formalización del Antropoceno para comunidades científicas más allá de la geología, generando así cierto grado de estandarización interdisciplinaria. Pero aquí la retórica es crucial. El AWG habla de estabilizar el concepto de una manera que sea “coherente” con la forma en que se entiende en otros dominios, habla de ser “convincientes” (en contraposición a “conclusivos”), y de mantener “relaciones sinérgicas” con otras disciplinas. En este sentido, el AWG parece comprometido a contribuir a la estandarización interdisciplinaria pero solo hasta cierto punto y con el debido proceso. Esto hace una diferencia importante. La estandarización debe surgir de interacciones libres y procedimientos participativos amplios. En otras palabras, el problema no es la estandarización en sí sino una estandarización “centralizada”. La patente interdisciplinariedad de los debates sobre el Antropoceno exige un debido proceso para decidir los estándares. En este sentido, el AWG desempeña un rol mediador, sensible a la diversidad de compromisos entre disciplinas.

4. Argumentos a favor de la formalización del Antropoceno en la ICS: críticas y propuestas

4.1. Perspectiva del geólogo futuro

Santana (2019) critica dos argumentos a favor de la formalización del Antropoceno y concluye que su reconocimiento formal por parte de la ICS debiese postergarse indefinidamente. El primero es el argumento de la “perspectiva del geólogo futuro”: La formalización del Antropoceno se justifica en base a lo que los futuros geólogos reconocerán como marcadores significativos en la estratigrafía para establecer el límite inferior del Antropoceno aproximadamente en nuestro tiempo presente. Santana argumenta que esta perspectiva, y las propuestas basadas en ella, caen en uno de tres problemas: El futuro geólogo podría ver evidencia de actividad humana en la estratigrafía, pero ésta 1) puede ser relativamente insignificante (una mera anomalía) porque los humanos podrían mitigar su impacto; 2) la señal estratigráfica podría reflejar solo una serie de catástrofes locales en lugar de eventos geológicos de alcance global de larga duración (no constituyendo una época) ; y 3) la señal estratigráfica podría considerarse una continuación de procesos comenzados en el Holoceno.

Estos problemas son barreras para la formalización descriptiva del Antropoceno. Por un lado, la perspectiva del futuro geólogo no ofrece evidencia empírica rigurosa para formalizar descriptivamente el Antropoceno como una época geológica, ya que se basa en criterios predictivos que pueden terminar siendo erróneos o proporcionar evidencia insuficiente. Por otro lado, existe el problema de la falta de un comienzo explícito para el Antropoceno, debido a una aparente continuación con procesos iniciados en el Holoceno. En dicho sentido, la crítica de Santana a la perspectiva del futuro geólogo se basa en su falta de oportunidades para una formalización descriptiva.

Esta falta de oportunidades para la formalidad descriptiva surge de una serie de incoherencias entre las propuestas basadas en la perspectiva del futuro geólogo y los principios actualmente adoptados por la ICS. Primero, hay una incoherencia de métodos entre el carácter predictivo implícito en la perspectiva del futuro geólogo y el carácter empírico del método GSSP. Segundo, las características del Antropoceno como época podrían ser incoherentes con las de otras épocas formalizadas, particularmente en términos de su duración y alcance global. Tercero, la formalización del Antropoceno sería incoherente con la del Holoceno, ya que los supuestos marcadores del Antropoceno podrían representar una continuidad con procesos iniciados en el Holoceno. Por lo tanto, interpreto la posición de Santana como un intento de salvaguardar la coherencia lograda entre los procedimientos de la ICS y las unidades cronoestratigráficas actualmente formales.

La coherencia dentro de un cuerpo científico suele ser un valor central. Sin embargo, tengo dos argumentos que permiten mantener la formalización del Antropoceno como una opción viable a pesar de su supuesta carga incoherente. Primero, la centralidad de la coherencia es compatible con la aceptación de incoherencia inmediata en pos de coherencia prospectiva. Abrir debates científicos a la diversificación de perspectivas y prácticas suele tener un efecto negativo inmediato en la coherencia general de la empresa en cuestión. Sin embargo, esta incoherencia inmediata puede entregar beneficios futuros, permitiendo la exploración de configuraciones que podrían conformar estados de coherencia más robustos, abarcando múltiples disciplinas e intereses científicos. La formalización del Antropoceno puede verse bajo este prisma. Es posible que las propuestas basadas en la perspectiva del futuro geólogo sean incoherentes con los lineamientos actuales de la ICS, pero estas propuestas atienden intereses de varias disciplinas científicas, y lo hacen acogiendo parcialmente los lineamientos de la ICS. La perspectiva es que todos los agentes involucrados en el debate del Antropoceno, incluida la ICS, puedan encontrar nuevas configuraciones que sean robustamente coherentes, incluso si esto implica el reajuste de las unidades cronoestratigráficas y protocolos de la ICS.

Segundo, es dubitable que la coherencia sea un valor inamovible en la ICS. En particular, Lucas (2018) señala que la ICS ha sido incoherente en su método de GSSP y esquemas de clasificación. Por ejemplo, diferentes subcomisiones han solicitado rangos excepcionales, como "subsistemas" para el Carbonífero y "subseries" para el Paleógeno. Además, diferentes subcomisiones adoptan distintos protocolos para actualizar o conservar los nombres de unidades cronoestratigráficas. Finalmente, hay criterios inconsistentes entre las subcomisiones al elegir las señales para definir los GSSP, cambiando de criterios bióticos a físicos a híbridos. Lucas argumenta que estas inconsistencias reflejan las diferentes filosofías, métodos, prioridades, y datos disponibles de las varias subcomisiones, y también reflejan una falla en la estandarización de términos y métodos en la ICS. Por lo tanto, el GSSP no constituye un método estrictamente coherente. Si Lucas tiene razón, entonces la carga incoherente de propuestas por formalizar el Antropoceno no podría utilizarse como razón suficiente para su rechazo. En una disciplina histórica y cualitativa como la estratigrafía, el valor de la coherencia es susceptible de transacciones significativas, como lo reflejan las prácticas de acomodación e incoherencia transitoria en el método GSSP.

4.2. Perspectiva sincrónica

Santana critica un segundo argumento en favor de la formalización del Antropoceno, denominado de la "perspectiva sincrónica". Según este, formalizar el Antropoceno se justifica a partir de las consecuencias sincrónicas de su formalización evaluativa, en particular sus efectos políticos. Santana se enfoca en lo que él considera el meollo del asunto, a saber, la conversión de escépticos del cambio climático, la cual promete una reconfiguración significativa del espacio político. Santana argumenta que la formalización del Antropoceno no garantiza la conversión de escépticos, aludiendo a casos históricos de consensos científicos que no se traducen en aquello. Más aún, Santana sugiere que la formalización del Antropoceno podría resultar contraproducente, polarizando aún más las facciones.

Presento dos reacciones a la crítica de Santana. Primero, la potencial instrumentalización política de la formalización del Antropoceno no se limita a la conversión de escépticos. Si éstos son un caso perdido, como Santana argumenta persuasivamente, el espacio político aún puede ser reconfigurado por los indecisos, los desmotivados, y las nuevas generaciones. La formalización del Antropoceno puede ser una señal política ignorada por los escépticos, pero de utilidad para quienes necesitan y a menudo buscan guía. En dicho sentido, estimo que el análisis de Santana en este punto es estrecho. Segundo, la formalización del Antropoceno por parte de la ICS es una señal política que, sin necesidad de ser intencionalmente instrumentalizada, reconfigura el espacio político y por lo tanto tiene un efecto concreto, incluso si sus consecuencias son impredecibles. En otras palabras, la falta de capacidad de instrumentalización no resta justificación en la generación de una señal política. Las señales políticas pueden o no ser estratégicas, pero esto no quita que, en su origen, son una declaración de principios y convicciones que tienen la fuerza de reconfigurar el espacio político de formas imprevisibles.

Palabras Clave: Antropoceno, Formalización, Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno (AWG), Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS), Sección y punto de estratotipo de límite global (GSSP).

Financiamiento: SURCA: "Understanding Under Uncertainty: Symbiotic Relations Between the Storyline Approach and the Philosophy of Scientific Understanding" (PNRR, Italia).

Evolución climática ambiental a través del uso de propiedades magnéticas y otros proxies, en sedimentos del bofedal de Coro Coro, Región de Arica y Parinacota

Kimberly Bravo González¹⁻², Héctor Pizarro¹, Adriana Aránguiz²⁻³, Manuel Prieto²⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Pl. Ercilla 803, Santiago, Región Metropolitana, Santiago, Chile

(2) Universidad de Tarapacá, Núcleo Milenio en Andean Peatlands (AndesPeat), Arica

(3) Universidad de Tarapacá, Departamento de Recursos Ambientales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Arica

(4) Universidad de Tarapacá, Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas, Facultad de Educación y Humanidades, Arica

Los bofedales son un tipo de humedales productores de turba ubicados en Los Andes tropicales y subtropicales. Estos desempeñan un papel crucial en la sostenibilidad de los ecosistemas de montaña y en la mitigación del cambio climático (Buytaert et al., 2011; Hribljan et al., 2015). Además, poseen una gran importancia para las comunidades del altiplano, ya que son utilizados como fuentes permanentes de forraje para el desarrollo de la ganadería (Orlove, 1977). A pesar de la importancia de estos ecosistemas para las comunidades andinas y el medioambiente, no existe una comprensión de cómo su mantención puede ser de vital importancia para la mitigación del cambio climático. Para aportar al desarrollo del conocimiento de estos humedales, este estudio se centra en el bofedal de Coro Coro ubicado a 5 km al suroeste de la localidad de Cosapilla, dentro de la Quebrada Chujluta, a 263 km de Arica. Su objetivo es interpretar la variabilidad climática ambiental durante el Holoceno tardío y establecer una relación con las transformaciones socioecológicas ocurridas a escala histórica.

Se analiza un testigo sedimentario de 5 m de largo, extraído desde la zona norte del bofedal, correspondiente a un sector sin pastoreo actual; con alta presencia de cojines de vegetación característica del bofedal del género *Oxychloe*. A partir de observaciones macroscópicas, apoyadas en imágenes de rayos x, se observó que el testigo está compuesto por depósitos palustres de granulometría fina, principalmente tamaño limo, con algunas capas de arcilla y arena. Cabe destacar que, al tratarse de un bofedal, el suelo en formación posee un gran contenido de material orgánico tipo turba.

Para cumplir con la finalidad de la investigación, se realizó un análisis de susceptibilidad magnética utilizando un Susceptibilímetro Bartington (MS2). Los valores de susceptibilidad magnética (X) varían entre $-1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ y $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$, con un valor promedio de $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$. Los valores más bajos de X se registran en los dos primeros metros de profundidad, con valores negativos, mientras que después de estos se observa alternancia entre valores positivos y negativos hasta los 4,8 m, con peaks de $10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ en los 2,1 m y $9,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ en los 2,5 m de profundidad. La parte final del testigo se caracteriza por valores positivos de susceptibilidad, con un peak de $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ a los 5 m. A partir de estos resultados, se puede decir que hay una variación mineralógica en profundidad, donde en los primeros 2 m de sedimentos predominaría una composición de minerales diamagnéticos, luego hay una alternancia entre minerales diamagnético y paramagnéticos y en la parte final la señal magnética podría estar controlada por minerales paramagnéticos +/- y ferromagnéticos (Tauxe, 1988; Evans y Heller, 2003).

Por otra parte, se efectuó un análisis de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), el cual permitió medir la composición de elementos metálicos a lo largo del testigo, destacando los resultados de plomo, níquel y molibdeno. La composición de plomo presentó una anomalía con un peak de 230 ppm en los 4,5 m de profundidad. Respecto al níquel, el análisis mostró que las concentraciones se mantuvieron con valores cercanos a 25 ppm hasta los dos metros, para luego saltar abruptamente a un promedio de 108 ppm hasta el final del testigo. Finalmente, las concentraciones de molibdeno tuvieron un promedio de 20 ppm en la mitad más somera del testigo, mientras que en la mitad más profunda el promedio disminuyó a 10 ppm. Estas anomalías podrían estar relacionadas a actividades antrópicas circundantes, como actividad minera o alto flujo de camiones que transportan combustible.

Estos corresponden a resultados preliminares que se completarán incluyendo análisis de granulometría láser. A partir de esos resultados se busca abrir una agenda de investigación que permita utilizar los sedimentos de los bofedales como fuentes de información valiosa sobre la relación entre la agencia humana en los procesos hidrológicos del altiplano; incluyendo fenómenos recientes como los efectos del extractivismo y el cambio climático.

Palabras Clave: Susceptibilidad magnética, ICP, Geología ambiental, altiplano de Arica, *Oxychloe*.

Financiamiento: Departamento de Geología, Universidad de Chile. Fondecyt Regular N° 1201527 "Dimensiones socioecológicas de los bofedales en el norte de Chile: Manejo local, variabilidad climática y extractivismo".

Agradecimientos: Fondecyt Regular N° 1201527 Laboratorio de Ecología Acuática, Universidad de Tarapacá, Laboratorio de Paleomagnetismo, Universidad de Chile.

Referencias:

- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19-33.
- Evans, M. y Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Elsevier Science. 317p.
- Hribljan, J., Cooper, D., Sueltenfuss, J., Wolf, E. C., Heckman, K., Lilleskov, E., & Chimner, R. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia.
- Orlove, B. (1977). *Alpacas, Sheep and Men: Wool Export Economy and Regional Society in Southern Peru*. New York, NY: Academic.
- Tauxe, L. (1998). *Paleomagnetic Principles and Practice. Modern Approaches in Geophysics*. Kluwer Academic Publishers. 299 p.

Análisis híbrido de las trayectorias evolutivas del paisaje del Antropoceno en la conurbación Talcahuano - Concepción, Chile

Christian Creixell¹, Carlos Flores², Roberto Nicolás Merino¹, Ángela Cifuentes³⁻⁴

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Santiago, Chile

(2) Comité Ecológico Humedales Cerro La U, Talcahuano, Chile

(3) Universidad de Chile, Laboratorio Transdisciplinar en Prácticas Sociales y Subjetividad (LaPSoS), Facultad de Ciencias Sociales

(4) Universitat Rovira i Virgili, MARC (Medical Anthropological Research Center), Tarragona, España

En esta contribución se analizan las manifestaciones del Neógeno terrestre y la reconstrucción del clima del Central Namib Desert. U-Pb silíceo y iones materiales del Antropoceno en las áreas urbanas de Concepción y Talcahuano, a través de un análisis híbrido desde la geología, las trayectorias sociales y el pensamiento crítico contemporáneo, con el fin de entender y analizar las relaciones problemáticas del entorno urbano con sus espacios naturales.

El paisaje local deriva principalmente de procesos geomorfológicos ocurridos a partir del Pleistoceno tardío, donde se generan terrazas marinas actualmente alzadas a más de 100 m s.n.m. Los principales rasgos geomorfológicos se formaron durante el Holoceno, tras una transgresión marina y posterior ocupación de las planicies de Talcahuano y Concepción por el sistema fluvio-deltaico del río Biobío. La migración de este cauce desde la bahía de Concepción a su posición actual llevó al establecimiento de sistemas de humedales alrededor de 3.870 años BP (Isla *et al.*, 2012).

La consolidación de asentamientos urbanos en la planicie de Concepción-Talcahuano con posterioridad al terremoto y tsunami de 1751 llevó a una progresiva ocupación de las llanuras del área de estudio. Sin embargo, el hito principal que marca un aumento significativo del reemplazo de los espacios naturales del Holoceno por una "antropomasa" (p.e. Elhacham *et al.*, 2020) destinada a suelos urbanos y de uso industrial, es la puesta en marcha de la planta siderúrgica de Huachipato en 1951. En las siguientes décadas se pudo observar un progresivo aumento de la industrialización, especialmente en torno a las bahías de Concepción y San Vicente. Este proceso tiene una marcada correlación temporal con el fenómeno global de la "Gran Aceleración". Las huellas estratigráficas de estos procesos llevados a cabo por la actividad humana, propios del Antropoceno, consisten en estratos de vertederos, compuestos por clastos líticos volcánicos y *tecnofósiles*, que cubren concordantemente a depósitos holocenos. A esto se suman terraplenes antropogénicos de concreto y otros rellenos, que se disponen concordantemente sobre arenas y limos del Holoceno, y que han ido cubriendo progresivamente los suelos de humedales urbanos, los cuales han perdido más de un 40% de su superficie en las últimas décadas (Smith y Romero, 2009; Aliste-Almuna *et al.*, 2012). Estas señales se suman a otras huellas ecológicas, tales como el reemplazo de la flora nativa por plantaciones forestales, especialmente fuera de las zonas urbanas. A lo largo del Humedal Rocuant-Andalién, es posible además reconocer estratos de arenas y gravas depositadas por el tsunami de 2010, que cubren a los estratos del Holoceno y del Antropoceno.

La continua modificación de los espacios naturales del Holoceno, junto con la expansión urbana experimentada durante el Antropoceno, han generado una mayor exposición de la población a los peligros geológicos, donde los más recurrentes son las remociones en masa.

La progresiva pérdida de espacios naturales holocenos y la creciente contaminación y el descenso de la calidad de vida, facilitados por las demandas propias de los discursos de progreso, generaron una devastación ambiental que alcanzó altos notorios a fines de la década de los 80. Si bien a partir de la década de los 90 comenzó un importante y efectivo proceso de descontaminación, especialmente en el humedal Rocuant-Andalién y el canal el Morro, se produjo una aceleración de los reemplazos de suelos naturales de humedales por suelos urbanos e industriales (Smith y Romero, 2009). Es interesante resaltar que los primeros comités autogestionados, pro-defensa de los espacios naturales, comenzaron a gestionarse en el mismo período, a lo que con posterioridad se han sumado políticas públicas, con la intención de recomponer asociaciones ecológicas, heredadas del Holoceno, donde hubo devastación antropocénica. Estas acciones develan prácticas colaborativas más allá de las soluciones tecnológicas, basadas en un devenir común del ser humano con otras especies que habitan este espacio, en sintonía con los modelos de pensamiento tentacular y la simbiopolítica, patentes en el pensamiento de Haraway (2019) entre otros.

Estas trayectorias dejan a la vista las variaciones ontológicas que se van sucediendo según avanzan las catástrofes ambientales durante el Antropoceno. Por otra parte, muestran que los paisajes del Antropoceno son muy heterogéneos y responden a múltiples factores locales, además de mostrar conexiones con procesos globales, especialmente relacionados al capitalismo de los siglos XX y XXI. Esto permite interpelar a la ciencia de la geología, en su necesidad de afrontar los problemas del Antropoceno desde miradas multi y transdisciplinarias, al considerar al ser humano ("*anthropos*") como un agente geológico y a la Tierra ("*Gaia*") como un ente político.

Palabras Clave: Antropoceno, Talcahuano, urbanización, Concepción.

Financiamiento: El levantamiento de terreno de esta investigación ha sido financiado por el Plan Nacional de Geología de Sernageomin, en el marco del proyecto carta Geológica Concepción-Talcahuano.

Referencias:

- Aliste Almuna, E.; et al. 2012. La dinámica del territorio en la conurbación Concepción-Talcahuano: huellas urbanas para una interpretación de las transformaciones ambientales durante la segunda mitad del siglo XX. *Revista de Geografía Norte Grande* 52, 5-18.
- Elhacham, E.; Ben-Uri, L.; Grozovski, J.; Bar-On, Y.; Milo, R. 2020. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature*. doi:10.1038/s41586-020-3010-5
- Haraway, D. 2019. Seguir con el problema. Generar parentesco en el Chthuluceno. Editorial Consonni, Bilbao, España.
- Smith, P.; Romero, H. 2009. Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga. *Revista de Geografía Norte Grande* 43, 81-93.
- Steffen, W. et al. 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2 (1) <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>.

Integración De Técnicas Geofísicas Someras Para El Estudio De Sitios Arqueológicos En El Desierto De Atacama (Caso De Estudio: Sitio Arqueológico Iluga Túmulos)

Fernanda Gallegos-Poch¹⁻², Benoît Viguière³, Gonzalo Yáñez Carrizo², Giovanni Menanno²⁻⁵, Camila López Contreras²⁻⁴, Catalina Lizarde², Jaime Araya⁴⁻⁶, Sergio Gutiérrez², Mauricio Uribe⁷, Valentina Mandakovic⁸, Pablo Mendes-Quiros⁹, Antonio Maldonado¹⁰⁻¹¹

- (1) GHD, Área de Earth Science IWM, Av. Américo Vespucio N°100, Santiago, Chile
 (2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Campus San Joaquín, Santiago, Chile
 (3) Université Côte d'Azur, OCA CNRS IRD GEOAZUR, Av. Valrose, Nice, France
 (4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803 Santiago, Chile
 (5) Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), Ministerio de Relaciones Exteriores, Teatinos 180, Santiago, Chile
 (6) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile
 (7) Universidad de Chile, Departamento de Antropología, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 1058, Santiago, Chile
 (8) Universidad de Tarapacá, Departamento de Antropología, 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile
 (9) Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Prehistoria, Gran Vía de les Corts Catalanes, 585, Barcelona, España
 (10) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Raúl Bitrán 1305, La Serena, Chile
 (11) Universidad Católica del Norte, Departamento de Biología Marina, Juan de Dios Peni 674, La Serena, Chile

Durante las últimas décadas, la aplicación de técnicas geofísicas en áreas externas a la geología ha aportado a la comprensión de procesos naturales y antropogénicos anteriormente asociados únicamente a otras disciplinas como la ingeniería estructural, la arqueología o la agricultura. Esto ha generado un impacto no solo en las disciplinas anteriores, sino que también en la geofísica, al presentar nuevos desafíos como la profundidad de penetración de la señal, la resolución del dato obtenido y la extensión y velocidad de muestreo. Lo anterior, ha potenciado la creación de nuevos equipos y ha abierto una serie de interrogantes a resolver.

Asociado al reciente desarrollo, las técnicas de geofísica somera capaces de mapear los primeros 3 metros de profundidad han sido aplicadas a una serie de disciplinas entre las cuales se incluye la arqueología. El estudio de los primeros metros del subsuelo ha permitido aumentar el área de investigación para delimitar zonas específicas de excavación, protegiendo el sitio arqueológico de excavaciones innecesarias que lo impactan irreversiblemente y lo exponen a la intemperie y la acción humana.

Los equipos comúnmente utilizados corresponden a equipos electromagnéticos de inducción y geo-radares para cubrir extensas zonas y encontrar anomalías en profundidad, las cuales son más tarde estudiadas en detalle por medio de perfiles de tomografía eléctrica o sísmica. La complejidad de uso de estos métodos reside principalmente en dos desafíos: la necesidad de contar con data de alta resolución para detectar anomalías centimétricas y la sensibilidad de la señal para reconocer pequeños contrastes entre las propiedades físicas del medio y el elemento en estudio.

Específicamente en el desierto de Atacama, la hiper aridez que caracteriza la zona aumenta la complejidad de los desafíos antes mencionados, ya que los contrastes eléctricos y de densidad entre el medio y los elementos en profundidad son muy pequeños, dificultando la utilización de equipos sísmicos y electromagnéticos de inducción (EMI). Además, la inyección de corriente asociada a perfiles de tomografía eléctrica es inviable producto de la imposibilidad de asegurar un buen contacto entre la estaca de inyección y el medio, descartando completamente la utilización del equipo. Lo anterior descarta las metodologías comúnmente utilizadas para la detección de anomalías en los primeros metros de profundidad.

El presente proyecto entrega una metodología basada en la integración de mediciones electromagnéticas utilizando un equipo GPR (Mala Easy Locator) y un equipo EMI (EM38-MK2) para la detección de anomalías de susceptibilidad magnética (normalmente consideradas un resultado complementario) para dilucidar el origen de miles de circunferencias alineadas en dirección ~NS en el sitio arqueológico Iluga ubicado en el desierto de Atacama.

Por un lado, en base a las mediciones realizadas, el GPR permitió el reconocimiento de depósitos aluviales, relleno eólico arenoso en agujeros preexistentes y la detección de raíces debajo de los rasgos circulares anteriormente mencionados. Por otro lado, los datos de susceptibilidad magnética derivados de la componente en fase EMI, permitieron identificar restos de fogatas en las proximidades de las circunferencias. Debido a la detección de las anomalías, se realizó una excavación que permitió verificar los hallazgos geofísicos, los cuales han sido publicados en el documento Gallegos-Poch et al. 2022.

Se ha concluido que los rasgos circulares corresponden a la evidencia en superficie de un extenso proceso de deforestación en la Pampa del Tamarugal, probablemente asociado a la producción de carbón vegetal. De acuerdo a fuentes locales, el proceso implicó la extracción del tronco completo y las raíces principales de Algarrobos (*Prosopis chilensis*) o tamarugos (*Prosopis tamarugo*), los cuales fueron quemados para la generación de carbón. La extracción del tronco y raíces generó de un agujero en profundidad, que más tarde fue rellenado por procesos eólicos naturales.

La metodología propuesta ofrece resultados prometedores para estudios arqueológicos y geológicos superficiales en ambientes hiper áridos y entrega nuevas herramientas para comprender el impacto del hombre en el medio que lo rodea. El estudio, por lo tanto, desafía la concepción que asocia al desierto de Atacama como una zona árida y desprovista de vida, entregando evidencia de la fertilidad de la zona y el impacto irreversible del hombre en ella.

Palabras Clave: Arqueogeofísica, Desierto de Atacama, GPR, EMI, Deforestación.

Financiamiento: Estudio fue financiado por FONDECYT N°1181392 y N°1181829.

Agradecimientos: Vicente González (registros históricos), agroprecisión (campaña geofísica EM38-MK2), Mauricio Uribe (invitación FONDECYT N°1181829) y Sergio Gutiérrez (financiamiento equipo GPR, FONDECYT N°1181392).

Referencias:

- Gallegos-Poch, F., Viguier, B., Menanno, G., Mandakovic, V., Yáñez, G., Gutiérrez, S., Lizarde, C., Vargas, J. A., López-Contreras, C., Mendez-Quiros, P., Maldonado, A., & Uribe, M. (2022). Integration of Near-Surface Complementary Geophysical Techniques for the Study of Ancient Archaeological Areas in the Atacama Desert (Pampa Iluga, Northern Chile). *Surveys in Geophysics*, 44(2), 495–525. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09750-z>.
- Castro Castro L (2020.) El bosque de la Pampa del Tamarugal y la industria salitrera: el problema de la deforestación, los proyectos para su manejo sustentable y el debate político (Tarapacá, Perú-Chile 1829–1941). *Scr Nova. Revista Electrón Geogr Ciencias Soc* 24:20. <https://doi.org/10.1344/sn2020.24.26507>
- dal Bo I, Klotzsche A, Bol R, Moradi G, Weihermüller L, Vereecken H, Kruk J (2021.) GPR and EMI characterization of the hyperarid study site of Yungay, Chile: implications of applying geophysical methods on mars. *Earth Space Sci*. <https://doi.org/10.1029/2021EA001790>
- Dalan RA (2008). A review of the role of magnetic susceptibility in archaeogeophysical studies in the USA: recent developments and prospects. *Archaeol Prospect* 15(1):1–31. <https://doi.org/10.1002/arp.323>
- Grellier S, Florsch N, Camerlynck C, Janeau J, Podwojewski P, Lorentz S (2013). The use of Slingram EM38 data for topsoil and subsoil geoelectrical characterization with a Bayesian inversion. *Geoderma* 200–201:140–155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.020>
- Le Borgne E (1955). Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann Geophys* 11:399–419.
- McNeill JD (1980). Electromagnetics terrain conductivity measure at low induction numbers. Tech. Note TN-6. Geonics Ltd, Mississauga, Ont., Canada. 13pp.
- Romero-Ruiz A, Linde N, Keller T, Or D (2018). A Review of geophysical methods for soil structure characterization. *Rev Geophys* 56(4):672–697. <https://doi.org/10.1029/2018RG000611>

Variación temporal de la línea de costa en playas formadas por sedimentos de relaves mineros en el litoral de Chañaral, Región de Atacama, Norte de Chile

Paloma Lazo Paredes¹⁻², Germán Aguilar Martorell², Camila Arróspide Vásquez²⁻³, María Pía Rodríguez¹

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Programa de doctorado en Ciencias mención Geología, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La morfología de la costa de Chañaral (26.33°S- 70.63°W) cambió significativamente debido al aporte de sedimentos de relaves mineros entre 1938 y 1990 (ca. 350 millones de toneladas). Desde 1938 a 1974, ca. 150 millones de toneladas de relaves fueron vertidas al río Salado y depositadas en su desembocadura, ubicada en la bahía de Chañaral. Debido a los perjuicios sobre las actividades portuarias, en 1975 se reubicó el punto de descarga 12 km al norte de Chañaral, en Caleta Palito, mediante la construcción de un canal artificial. Este sitio, donde la costa era mayoritariamente rocosa, recibió 126-150 millones de toneladas de sedimentos de relaves entre 1975 y 1990 (Castilla, 1983). La descarga al mar de los relaves no tratados cesó en 1990 y desde entonces estos son depositados en el Tranque Pampa Austral. En este trabajo se cuantificó la variación de la línea de costa en los dos sitios de descarga durante el periodo 1928-2021. La posición de la línea de costa se determinó sobre fotografías aéreas e imágenes satelitales pancromáticas para los años 1943, 1956, 1981, 1997 y 2021 utilizando el análisis de perfiles de reflectancia en 89 transectas trazadas cada 100 m a lo largo de la costa en el software QGIS. Las imágenes fueron previamente corregidas aplicando una ortorectificación que consideró 80 puntos de control medidos en terreno con GPS diferencial. La línea de costa se representó como una polilínea vectorial formada por la unión de una serie de vértices, correspondientes a los 89 puntos identificados en los perfiles de reflectancia, que marcan la posición del máximo alcance del oleaje. En el caso particular del año 1928, la línea de costa se extrajo de la carta náutica n° 36 para el puerto de Chañaral elaborada por la Marina de Chile. Los resultados para la Playa Grande, localizada en la bahía de Chañaral, señalan que desde 1928 hasta 1981 la línea de costa migró mar adentro a tasas promedio de 5 m/año (1928-1943), de 23 m/año (1943-1956) y de 14 m/año (1956-1981). Esta fase de progradación se correlaciona con el periodo de descarga de los relaves. Posteriormente, la línea de costa retrocedió hacia el continente a una tasa promedio de 1 m/año (1981-1997) y de 2 m/año (1997-2021). Con respecto a la línea de costa al norte de Caleta Palito, no se observan variaciones importantes en el periodo 1943-1956, con tasas que muestran un retroceso de hasta 0.2 m/año. En cambio, durante el periodo 1956-1997 la línea de costa avanzó considerablemente hacia el mar, producto del desarrollo de playas que previamente no existían: Playa El Refugio y Playa Los Amarillos. Al igual que en el caso de Playa Grande en Chañaral, la etapa de progradación se correlaciona con el periodo de descarga de los residuos en Caleta Palito. Entre 1956 y 1981, la progradación fue mayor en El Refugio donde ocurrió a una tasa promedio de 5 m/año, mientras que, en Los Amarillos, localizada más lejos del punto de descarga, se desarrolló a una tasa promedio de 1 m/año. Luego, entre 1981 y 1997, el avance mar adentro fue mayor en Los Amarillos a una tasa de 17 m/año versus una tasa de 2 m/año en El Refugio. Finalmente, desde 1997 a 2021, la línea de costa retrocedió en ambas playas a tasas de 4 m/año (El Refugio) y de 1 m/año (Los Amarillos). En conclusión, la playa Grande de Chañaral progradó a tasas de hasta 23 m/año durante la descarga de los residuos mineros entre 1938 y 1974. Por otra parte, debido a la descarga de relaves entre 1975 y 1990 en Caleta Palito, se formaron nuevas playas hacia el norte, donde la línea de costa progradó a tasas de hasta 17 m/año. Luego del cese de la descarga de sedimentos de relaves, la línea de costa en estas playas artificiales hLate Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and a retrocedido por la acción mecánica del oleaje a tasas de hasta 4 m/año. Los resultados contribuyen a comprender cómo evoluciona una costa que ha recibido un significativo aporte artificial de sedimentos, como lo son los relaves mineros, así como a reconocer el impacto de esta forzante antrópica en la dinámica costera y sus procesos naturales de cambio.

Palabras Clave: Chañaral, erosión costera, línea de costa, relaves mineros.

Financiamiento: FONDECYT N° 1221274: Data and physically consistent characterization of coastal changes via machine learning techniques: human-induced changes on near-shore sediment system in an arid rocky coast.

Agradecimientos: FONDECYT N° 1221274, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Atacama (UDA).

Referencias:

- Castilla, J. C. (1983). Environmental impact in sandy beaches of copper mine tailings at Chañaral, Chile. Marine pollution bulletin, 14(12), 459-464.

Variación interanual y decadal del contenido de sílice disuelto durante otoño-invierno en la zona costera de Chile central (36°S); potenciales causas e impacto en la comunidad de fitoplancton

Vicente Méndez-Freire¹⁻²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas., Barrio Universitario S/N, Concepción, Chile

(2) Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera (SECOS), Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile

Las cuencas hidrográficas son fundamentales a nivel ecosistémico por su capacidad de encauzar las aguas meteóricas, transportando agua, compuestos y sedimentos (nutrientes, minerales e incluso contaminantes). En Chile, las cuencas más grandes conectan la Cordillera de los Andes (producción de minerales) y la Depresión Central (confluencia de múltiples cauces) con el Océano Pacífico (sumidero), donde los ecosistemas se ven beneficiados/afectados de los diferentes tipos de sedimentos/compuestos descargados. Los silicatos son abundantes en la cordillera (rocas ígneas extrusivas; dioritas, granodioritas, tonalitas y basaltos) y, por acción de la erosión, meteorización e interacción con el agua, se hidrolizan para llegar al océano en estado disuelto (ácido silíceo o silicatos, un nutriente inorgánico), pudiendo ser así asimilado por las microalgas para formar tejidos duros (frústulos). Por lo tanto, variaciones en la descarga de sílice (tanto disuelto como particulado) al océano costero limitan el crecimiento de microalgas. Una alteración significativa en los caudales/escorrentía de los ríos puede incurrir en un estancamiento de los sedimentos y/o en una desconexión del sistema de cuenca, impidiendo la incorporación de estos a los ríos y su posterior descarga a la zona costera.

El presente estudio tiene como objetivo analizar los efectos o impactos en la disminución de las descargas de sílice disuelto (DSi) y los cambios en la proporción de nutrientes inorgánicos N:DSi y P:DSi, en parte debido a la disminución de las precipitaciones en la cuenca del río Itata, sumado a los cambios en la biomasa y la abundancia relativa de micro, nano y pico fitoplancton en periodo otoño-invierno. El estudio se enfocará en la plataforma continental, frente a la desembocadura de la cuenca del río Itata en Chile central (36°S), una cuenca intervenida y con una disminución paulatina en el caudal y descarga de sedimentos. La variación interanual y tendencia decadal en la concentración de DSi y la razón N:DSi, P:DSi se cuantificó por medio de la serie de tiempo (dos décadas) de nutrientes y otras variables en la plataforma continental frente a la desembocadura del río Itata, sumado a los cambios en la estructura de la comunidad de fitoplancton en términos de biomasa por tamaño con una base de datos existente para la temporada otoño-invierno por medio de análisis satelital. Con este trabajo se podrá evidenciar la importancia de los estudios integrados a nivel de cuenca, considerando que las medidas tomadas para el continente repercuten directamente en los ecosistemas costeros.

Palabras Clave: Sílice disuelta, Mega sequía, escorrentía, fitoplancton, sensores remotos.

La megasequía en la cuenca del río Itata, Chile (36°-37°S): Cambios temporales en los flujos de sedimentos y la carga sedimentaria

Vicente Méndez-Freire¹⁻²⁻³, Tania Villaseñor³, Claudia Mellado⁴

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(2) Instituto Milenio de Socio-Ecología Costera (SECOS), Santiago, Chile

(3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(4) Hidrogeología y Medio Ambiente Sustentable (Hidromas), Suecia 211, Providencia, Santiago, Chile

Chile central se ha visto afectado por un déficit sostenido de precipitaciones desde 2010, la llamada megasequía, que ha provocado una disminución de la descarga de agua en las cuencas fluviales de esta región, afectando los flujos de sedimentos. En este trabajo investigamos los cambios en los flujos de sedimentos en suspensión en la cuenca del río Itata (36-37°S, 11.326 km²) en Chile central durante un período de 30 años (1986-2017) para evaluar el papel de la megasequía en esta región. Utilizamos un conjunto de datos de descarga de agua y concentración de sólidos totales en suspensión medidos diariamente desde una red de estaciones de aforo que cubren la cuenca desde la zona cordillerana hasta la desembocadura del río. Estimamos las variaciones temporales de los flujos de sedimentos dentro de la cuenca. Al comparar los periodos de pre-sequía (1986-2009) y sequía (2010-2017), encontramos que los flujos anuales de sedimentos durante la mega sequía disminuyeron entre un 28% y un 67% respecto a los valores de pre sequía, con una intensidad variable entre los principales afluentes. Además, el periodo de máximo transporte de sedimentos y descarga de agua en la cuenca se ha desplazado desde mayo-junio (pre-sequía) a agosto durante la sequía. Interpretamos que el déficit de precipitaciones durante la megasequía retrasa la recarga anual de la humedad del perfil de suelo lo que resulta en la dilación de la movilización de sedimento por la escorrentía; meses después de la época principalmente lluviosa. Debido a que el transporte de sedimentos en la cuenca ocurre bajo condiciones de menor flujo de agua en comparación con el período anterior a la sequía, también interpretamos que la sequía inhibe el transporte de sedimentos en este sistema. Estos efectos se combinan con aquellos derivados de la historia de uso de suelo en esta cuenca, dominado por actividad agrícola y forestal, lo que ha favorecido la pérdida de suelo y la construcción de infraestructura para regadío que agrega un factor adicional a los cambios en los flujos sedimentarios en la cuenca. Estos cambios tienen implicancias en el rol ecosistémico que proporcionan las cuencas hidrográficas, donde la descarga desde los ríos hacia la costa se asocia al transporte de nutrientes (e.g. nitratos, fosfatos y sílice disuelto) los cuales son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de organismos fitoplanctónicos costeros, el primer eslabón de la cadena trófica y sostén de los ecosistemas costeros. Considerando las proyecciones climáticas futuras para Chile central sobre reducción de precipitación y aumento de temperaturas, es probable que la dinámica de descarga sedimentaria en esta cuenca, así como en cuencas fluviales similares en la región, continúe cambiando en la medida que las condiciones hidroclimáticas secas se mantengan en las próximas décadas, afectando tanto en el continente como en las costas de nuestro país.

Palabras Clave: Transporte de sedimentos, Mega sequía, Chile central, Cuenca del río Itata.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto PAI de ANID de Subvención a la Instalación en la Academia (CONVOCATORIA AÑO 2019 PAI 77190019). Investigadora responsable del proyecto Dra. Tania Villaseñor.

Isotopic and geochemical tools to monitoring ecosystem services provided by native forest: the case study of the Nonguén National Park in the coastal area of south-central Chile

Ignacio Bernard Barriga¹⁻⁴, Verónica Oliveros¹, Laura Farías²⁻⁵⁻⁶, Oscar Cartagena Rubilar¹, Mauricio Aguayo Arias³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
 (2) Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
 (3) Universidad de Concepción, Departamento de Planificación Territorial y Sistemas urbanos, Facultad de Ciencias Ambientales, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
 (4) Mi agua limpia Consultores, Chiguayante, Chile
 (5) Center for Climate and Resilience Research (CR)2, Santiago, Chile
 (6) Millenium Institute of Socioecology (SECOS), Santiago, Chile

The Chilean population is highly vulnerable to the current climate crisis, with a decade-long drought affecting the coastal lands of south-central Chile. Alongside the decline in precipitation and atmospheric temperature and more than six decades of replacement of native forests by fast-growth exotic plantations (*Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus/nitens*) has resulted in lesser water reserves. This extensive replacement has caused an increased nutrient and sediment loss to streamflow and promoted the soil degradation, effects that should be smaller or non-existent if native forest persist (Lara et al., 2021).

Our study area is the “Nonguén National Park”, a 3000-ha relict patch of the sclerophyllous forests of central Chile located in the metropolitan area of Concepción surrounded by exotic plantations and agricultural lands, that feeds the Nonguén river, an important supplier of drinking water to ~100,000 inhabitants (Martínez-Retureta et al., 2022).

Usually, the ecosystem services of water provision and quality are monitored through daily, or seasonally, streamflow, runoff, atmospheric and water pressure and wells. Here, we propose the use of geochemical proxies as additional tools for monitoring the efficiency of the ecosystem services provided by the Nonguén native forest. We measured streamflow dO, dH, nitrate/nitrite, phosphate and pH-EC in 27 locations of tributaries and nested points of the main river in the Nonguén watershed at the beginning of summer, autumn, winter and spring seasons. The watershed is further divided in three smaller catchments of contrasting land use: the southern catchment (SC) with only native forest (but connected to agricultural lands), the eastern catchment (EC) with both native forest and exotic plantations and the northern catchment (NC), the downstream flow area, with only exotic plantations. The catchments were defined with the aim of evaluating the impact of land use over the ecosystems services.

The hydrological balance of the Nonguén watershed was obtained from the SWAT model of Martínez-Retureta et al. (2022). The results of the streamflow geochemical parameters in each sampling point were extrapolated considering the “Hydrological Response Units” of the SWAT model, obtaining a geographical distribution of nutrients and isotopic variations.

Our results show that during the autumn and winter seasons there is a slight difference between the O and D isotopic signature of the surface water coming from SC and EC-NC, with the former exhibiting the largest deviation from the Local Meteoric Water Line (LMWL), suggesting higher retention rates and larger contribution from groundwater. Nutrients, on the other hand, are slightly more diluted in the SC and EC, recording a significant increase downstream, where exotic plantations and urban activities dominate. In spring and summer seasons (the driest period of the year) larger isotopic deviation from the LMWL in waters sourced in the native forest area (SC), compared to those where exotic plantations (EC) are observed. Within the SC a very significant decrease in nutrients is observed from the upper part of the catchment to the output area, bordering to the NC, suggesting that the less degraded soil in the native forest area acts as a more efficient system of ion exchange, helping to retain nutrients from waters.

Even though the variation on the geochemical parameters is rather small, it corresponds to statically significant changes from the EC and SC, that can be interpreted in the context of groundwater recharge and surface water-soil interaction within the watershed. Therefore, we propose that these cost-effective geochemical tools may be part of a more diverse toolbox of chemical proxies that would help to monitor the ecosystem services provided by areas with native forest dominance as well as in future implementation of nature-based solutions for water provision and quality.

Keywords: water isotopes, ecosystem services, native forest, coastal watersheds, geochemistry.

Financing: Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción. CR2- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia.

Acknowledgments: Laboratorio de Biogeoquímica, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción. Gerardo García, asistencia en la medición de isótopos y nutrientes. Rebeca Martínez-Retureta, modelo hidrológico.

References:

- Bernard, I. (2023). Caracterización hidroquímica e isotópica del servicio ecosistémico provisto por el Parque Nacional Nonguén en la cuenca Conguén (36°48'58"-36°56'13"S y 72°56'40"-73°01'42"W). Memoria para optar al título de Geólogo, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción.
- Lara, A., Jones, J., Little, C., & Vergara, N. (2021). Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile. *Hydrological Processes*, 35(8), e14270.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N.J., Urrutia, R., Echeverría, C., Lagos, O., Rodríguez-López, L., Duran-Llacer, I., Barra, R.O. (2022) Influence of Climate and Land Cover/Use Change on Water Balance: An Approach to Individual and Combined Effects. *Water*, 14(15), 2304.

Estudio preliminar de la dinámica sedimentaria costera en la Bahía de Valparaíso (32°S)

Javiera Rodríguez Vignolo¹, Valentina Flores Aqueveque¹, Renato Simonetti², Catalina Aguirre³, Diego Carabias²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) ARKA, Maritime Archaeology, Casilla 21, 2340000, Valparaíso, Chile

(3) Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Valparaíso, Chile

Este trabajo está enfocado en la bahía de Valparaíso, situada en la costa central de Chile, donde se encuentra uno de los puertos más importantes de Chile y Latinoamérica. Éste está protegido de los vientos y de las marejadas provenientes del norte por el molo de abrigo, construcción que tiene una longitud total de 850 m. En la zona protegida por el molo se encuentra el malecón de atraque con una extensión de 1000 m y el espigón de atraque con una longitud de 590 m.

Se ha evidenciado que la dinámica del puerto se encuentra antropizada, esto se vincula con la infraestructura de protecciones físicas antes mencionadas, que generan un cambio sobre la circulación marina, afectando a los parámetros físicos y químicos. Además, se ha reportado la contaminación por elementos químicos vinculables a la acción humana con el uso del espacio portuario y su localización en el límite del borde costero con la ciudad de Valparaíso.

Además en esta bahía existen sitios arqueológicos sumergidos que son de gran importancia histórica y cultural. Por tanto, es crucial entender cómo estos fenómenos afectan los procesos dinámicos de la bahía, con el fin de identificar su influencia en estos vestigios arqueológicos y en el ambiente geológico-oceanográfico de la bahía.

La hipótesis de este proyecto es que en la bahía de Valparaíso, en el sector recinto portuario, los fenómenos antrópicos estarían afectando los procesos sedimentarios por sobre los fenómenos naturales, mientras que su objetivo principal es el análisis de la influencia de los efectos antrópicos y naturales sobre la dinámica costera en la bahía de Valparaíso. Para ello es que es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos (OE):

- OE1: Determinar la dinámica actual a partir de las evidencias sedimentológicas para entender la distribución del tamaño de grano del fondo marino y así definir dominios de energía al interior de la bahía.
- OE2: Analizar la influencia antrópica a partir de la composición geoquímica de los sedimentos.
- OE3: Estudiar las secuencias estratigráficas del lecho marino para conocer la dinámica sedimentaria del pasado.
- OE4 (Caso particular): Estudiar los naufragios y su efecto sobre los procesos sedimentarios locales.

La metodología utilizada en este trabajo consiste en la integración de información de sedimentología y geoquímica obtenida de 76 muestras extraídas con draga del lecho marino en las cotas de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad y abarcan una longitud de 5 kms paralela a la línea de costa. Éstas fueron sometidas a un análisis granulométrico para determinar los distintos niveles de energía dentro de la bahía. Por su parte la geoquímica podrá evidenciar los posibles focos contaminantes en la zona de estudio. También se obtendrán datos sísmicos que permitirán la construcción de perfiles sísmicos y estratigráficos, e imágenes de fondo marino (sonar de barrido lateral) para observar estructuras sedimentarias en el lecho marino que ayudarán a interpretar la dinámica sedimentaria de la bahía.

Se proyecta observar una evolución significativa en los ambientes sedimentarios relacionada a la intervención del borde costero en la bahía de Valparaíso, donde en las zonas de menor energía, es decir, donde existe protección de la infraestructura portuaria, el sedimento debería ser de menor tamaño y sin presencia de estructuras sedimentarias, en cambio, en zonas de mayor energía ya que está expuesto a corrientes, el sedimento debería ser de mayor tamaño y con existencia de estructuras sedimentarias. También se espera que exista un cambio entre estratos profundos con respecto a otros más superficiales, marcando una diferencia temporal (un antes y un después de la construcción del puerto de Valparaíso). Y que se encuentren elementos químicos que confirmen la contaminación de la zona de estudio.

Palabras Clave: antrópico, sedimentología, dinámica sedimentaria, granulometría, SONAR.

Financiamiento: Tanto el arancel como los análisis y campañas de terreno asociados al desarrollo de mi tesis serán financiados con presupuesto del proyecto Núcleo Milenio Océano, Patrimonio y Cultura (OHC), NC2021_040, el cual depende de la Iniciativa Científica Milenio ANID. En este proyecto mi profesora guía la Dra. Valentina Flores participa como Investigadora Principal a cargo de las actividades relacionadas a la geología.

Intensidad, Duración y Frecuencia de precipitaciones máximas en Chile utilizando productos grillados de precipitación de alta resolución espacial

Cristóbal Soto Escobar¹⁻², Violeta Tolorza¹, Mauricio Zambrano-Bigiarini³⁻⁴

(1) Universidad de la Frontera, Temuco, Chile

(2) ICASS Spa, Santiago, Chile

(3) Universidad de la Frontera, Departamento de Ingeniería Civil, Temuco, Chile

(4) Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Santiago, Chile

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se utilizan en hidrología para caracterizar la intensidad de la lluvia en función de su duración y su periodo de retorno. Su elaboración permite el diseño de obras civiles que mitiguen el impacto de eventos extremos de precipitación. La intensidad de la lluvia determina además buena parte de los procesos geomorfológicos, por lo cual su distribución espacial es relevante para la evaluación de una serie de riesgos naturales. Este trabajo es un esfuerzo por contribuir al conocimiento sobre la distribución de las precipitaciones máximas en Chile y su comportamiento en el tiempo.

En la actualidad, la disponibilidad de productos grillados de precipitación ofrece nuevas posibilidades para el cálculo de curvas IDF, especialmente en ubicaciones donde no se cuenta con una red de pluviómetros de una densidad suficientemente alta como para caracterizar adecuadamente la distribución espacial de los eventos de precipitación. Sin embargo, es fundamental investigar la precisión y la incertidumbre asociada a los productos grillados de precipitación. Esto garantizará que se utilicen de manera adecuada y se tomen decisiones informadas tanto en el diseño de estructuras hidráulicas como en la evaluación de riesgos naturales asociados a lluvias extremas.

En este estudio se utilizaron tres conjuntos de datos públicos de precipitación de alta resolución espacial y temporal en todo Chile Centro-Sur (26-56°S). En particular se utilizaron las estimaciones de precipitación denominadas Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG V06B), con una resolución temporal de media hora y una resolución espacial de 0.1° x 0.1° para el período 2001-2020. También se utilizó la quinta generación de los conjuntos de datos ECMWF Reanalysis (ERA5) con una resolución temporal de una hora y una resolución espacial de 0.25° x 0.25° para el periodo 1981-2021, junto con el conjunto de datos de reanálisis ERA5-Land, que cuenta con una resolución espacial mejorada de 0.1° x 0.1° para el periodo 1981-2021.

En primer lugar, las intensidades máximas para tormentas de duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18 y 24 horas de estos tres productos fueron evaluadas frente a sus correspondientes valores registrados en 175 pluviómetros con registros horarios de precipitación, utilizando una comparación punto-píxel. Luego se calculó el sesgo de las intensidades máximas de cada producto grillado, para luego aplicar una corrección de sesgo en toda la zona de estudio.

A pesar de que el diseño de la infraestructura actual se basa principalmente en las curvas IDF bajo un supuesto estacionario, varios estudios en la última década han indicado que los registros hidrometeorológicos presentan algún tipo de tendencia. Por lo tanto, en segundo lugar, se analizó la estacionariedad de los datos grillados de precipitación, mediante el test de Mann-Kendall.

Por último, se estimaron curvas IDF para eventos extremos de precipitación de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18 y 24 horas de duración, y para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Estas fueron estimadas considerando tanto condiciones climáticas estacionarias como no estacionarias, con el fin de determinar las diferencias en los valores de intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno bajo ambas condiciones.

En resumen, este estudio analiza la viabilidad de utilizar datos grillados de precipitación en el diseño de obras hidráulicas en Chile. Se evalúa la precisión de estos datos, se detectan tendencias a lo largo del tiempo y se estiman las curvas IDF correspondientes. Estos resultados contribuyen al conocimiento sobre las precipitaciones máximas en el país, su evolución temporal y esperamos que sean útiles para diseños más resilientes en Chile.

Palabras Clave: Eventos extremos, Intensidad de precipitación.

Financiamiento: Este trabajo agradece al proyecto FONDECYT 11190864.

Discrete disturbances, connectivity and a persistent drought at Purapel catchment

Violeta Tolorza¹, Christian H Mohr², Mauricio Zambrano-Bigiarini¹⁻³, Benjamín Sotomayor⁴, Dagoberto Poblete-Caballero⁵, Sebastien Carretier⁶, Mauricio Galleguillos-Torres³⁻⁷

(1) Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

(2) University of Potsdam, Institute of Environmental Science and Geography, Potsdam, Germany

(3) Center for Climate and Resilience Research (CR2), Blanco Encalada 2002, 4th floor, Santiago, Chile

(4) Dron Aerogeomática SpA, Spatial Data and Analysis in Aysén, Coyhaique, Chile

(5) Universidad de Chile, Department of Environmental Sciences, School of Agronomic Sciences, Santiago, Chile

(6) Geosciences Environnement Toulouse, IRD, OMP, UPS, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, Francia

(7) Universidad Adolfo Ibáñez, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Peñalolén, Chile

The Purapel catchment lies within a soil-mantled landscape that is able to store valuable supplies of fresh water and potentially support a biodiverse native forest. Nevertheless, human intervention has been increasing soil erosion for ~200 yr with intensive management practices under exotic tree plantations for the last ~45 yr. At the same time, this landscape has been experiencing a prolonged megadrought. In this setting, it is not well understood how anthropogenic disturbances and hydrometeorologic trends affect sediment transport.

Here we calculate a 10¹-year-scale catchment erosion rate from suspended sediments and compare it with a 10⁴-year-scale catchment denudation rate estimated from detritic ¹⁰Be. We explore these rates against effects of discrete disturbances and hydroclimatic trends. Erosion/denudation rates are similar on both time scales (10⁴ and 10¹ year). Recent human-made disturbances include logging operations during all seasons and the establishment of a dense network of forestry roads, which increase structural sediment connectivity. Other main disturbances include two widespread wildfires (2015 and 2017) and a Mw 8.8 earthquake (2010).

We observe a decreasing trend in suspended sediments between 1986-2018, which coincides with the decline in several hydroclimatic parameters, such as streamflow, baseflow, precipitation and aridity. The low 10⁴-year denudation rate agrees with a landscape dominated by slow diffusive soil creep. The low decadal erosion rate and the decrease in suspended sediments, however, conflicts with the observed disturbances and the increased structural connectivity. This paradox suggests that, either recent erosion is underestimated, and/or the decennial sediment flux were smeared by decreasing rainfall and streamflow. Our findings indicate that human-made disturbances and hydrometeorologic trends may result in opposite, partially offsetting effects on recent erosion, however both contribute to the degradation of the landscape.

Keywords: Suspended sediments, erosion, denudation, Tree plantations.

Financing: FONDECYT project 11190864, FONDAP project 15110009.

Acknowledgments: This work arises from research funded by ANID (FONDECYT project 11190864, FONDAP project 15110009) and the UFRO Postdoc grant VRIP20P001.

Evolución del balance de masas del glaciar El Potro, Tercera Región de Atacama, Chile

Javiera Valdés Opazo¹, Francisco Fernandoy Pedreros¹⁻², Ayón García Piña³

(1) Facultad de ingeniería, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile

(2) Laboratorio de Análisis isotópicos – LAI, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile

(3) Facultad de ingeniería, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

El Potro corresponde a un glaciar de montaña, que se encuentra ubicado en la tercera Región de Atacama, posee un área total de 7 km² considerándolo el más grande del norte de Chile. Una de las características que lo destacan, es la pérdida de área relativamente menor en comparación con otros glaciares ubicados en la misma región a pesar de presentar las mismas condiciones climáticas y una altura similar, atrayendo así el interés por estudiar a qué se debe su comportamiento. Esta investigación pretende, mediante métodos indirectos, comprender los factores principales que afectan la dinámica del glaciar El Potro frente a las condiciones de estrés hídrico, las cuales se han ido incrementando a partir del año 2010 y aumentos en las temperaturas que se han visto reflejadas en la Región, en un período de tiempo que contempla los años entre 2000 y 2020, presentando como resultados tres balances de masa geodésicos, obtenidos mediante modelos de elevación digital (DEM), utilizando ALOS, SRTM y Copernicus DEM entre los años 2000-2014 y cálculos de retroceso y/o avance del glaciar entre los años 2000-2020 utilizando imágenes ópticas. De estas metodologías se obtiene un balance promedio total de - 2.45 m eq. a, un retroceso promedio de 197,12 metros y un avance de 206,98 metros durante el período analizado. Evolutivamente hablando, El Potro ha presentado un retroceso virtualmente pequeño comparado a la superficie total de éste. Además, a pesar de que ha experimentado episodios tanto de retroceso y avance, estos se evidencian más en las lenguas del glaciar tanto de la zona de ablación como en la de acumulación. En base a los resultados obtenidos, se propone que el equilibrio dinámico del glaciar logra sostenerse debido a que los aportes de precipitaciones sólidas que dan lugar a la cubierta nival dependen directamente de los eventos de ENSO (Niño-Oscilación del Sur) y en menor medida de los aportes del Invierno Altiplánico. De esta forma los aportes climáticos provenientes del océano Pacífico y del océano Atlántico alimentan al glaciar, provocando un equilibrio en él.

Palabras Clave: Glaciar, DEM, Balance de Masa Geodésico, Imágenes Multiespectrales, ENSO.

Evolución del reservorio magmático bajo el Volcán Azufre, Región de Antofagasta

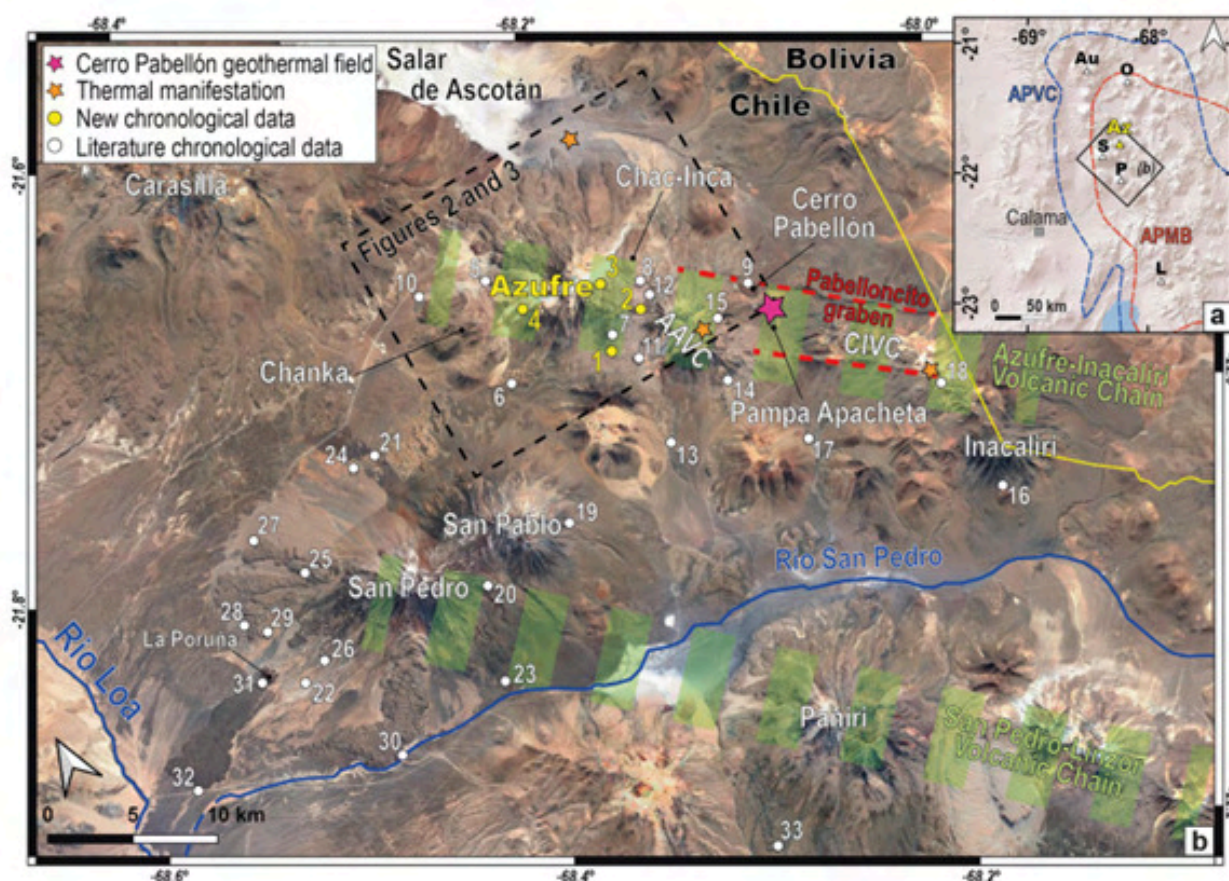
Sophia Aedo¹, Osvaldo González Maurel¹, Benigno Godoy²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Química, Las Heras 915, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile

(2) USS, Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Bellavista 7 - Recoleta, Santiago, Chile

Introducción

El Volcán Azufre (21°47'S, 68°15'W) se ubica en la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes del norte de Chile dentro del Complejo Volcánico Altiplano-Puna (CVAP; 21-24°S) (de Silva, 1989). Este volcán forma parte de la Cadena Volcánica Azufre-Inacaliri del Pleistoceno (Rivera et al., 2020), a ~10 km al NW de la Planta Geotérmica Cerro Pabellón que se encuentra actualmente en operación. Recientemente, Godoy et al. (2022) reconstruyeron la historia volcánica del Azufre, mientras que Godoy et al. (2023) determinaron la magnitud de la diferenciación magmática. La ubicación del reservorio magmático bajo el volcán Azufre, sin embargo, aún no ha sido estudiado en detalle. En este trabajo emplearemos termobarómetros descritos por Putirka (2008) en muestras de lava provenientes de las etapas definidas por Godoy et al. (2022), y así, estimar las condiciones de presión y temperatura y, por lo tanto, la(s) profundidad(es) de almacenamiento magmático.



Marco Geológico

El CVAP se sitúa sobre una corteza continental engrosada (~ 70 km; Beck et al., 1996) y cubre un área de más de 70.000 km² distribuido en el límite territorial entre Chile, Bolivia, y Argentina. El CVAP está asociado a la erupción de grandes volúmenes de ignimbritas ricas en sílice (>65 wt%), formado en cuatro pulsos principales desde hace 10 Ma, indicando un alto flujo magmas corticales relacionados con una alta afluencia de magmas derivados del manto (de Silva y Gosnold, 2007).

Entre 4 y 30 km debajo del CVAP, se encuentra el Cuerpo Magmático Altiplano-Puna (Chmielowski et al., 1999), una zona con bajas señales de propagación sísmica, altas temperaturas y alta conductividad eléctrica, que corresponde a un cuerpo parcialmente fundido emplazado dentro de la corteza superior, el cual es considerado como la región de origen de las ignimbritas y otros productos volcánicos del CVAP (Chmielowsky et al., 1999). Este cuerpo, que se caracteriza por una fracción de fusión de hasta el 25% y una temperatura estimada de ~ 1.000 °C, se interpreta como un batolito dentro de la corteza dispuesto sobre una zona MASH (*Melting-Assimilation-Storage-Homogenization*) situada en la corteza que contamina los magmas derivados del manto con diferentes grados de asimilación (de Silva y Gosnold, 2007).

En el sector NW del CVAP, se encuentra la cadena volcánica Azufre-Inacaliri, que está constituida principalmente por flujos de lava andesítico a dacíticos, y esta cubre un basamento de lavas e ignimbritas intermedias a ácidas (Rivera et al., 2020) relacionadas con las erupciones tipo caldera del CVAP, el cual se encuentra activo durante los últimos 10 Ma (de Silva, 1989). Las estructuras volcánicas de la cadena han sido afectadas localmente por fallas normales NW-SE relacionadas con el graben Pabelloncito, formado durante una fase extensional del Plioceno Tardío-Cuaternario, se extiende desde el Volcán Azufre hasta el Volcán Inacaliri (Rivera et al., 2020).

Volcán Azufre

Godoy et al. (2022) proveen una descripción detallada de la evolución volcanológica del volcán Azufre. Este se generó en cuatro etapas magmáticas separadas (I, II, III, IV) construyéndose a través del tiempo entre los años 1.300 y 120 ka sus edificios Norte y Sur, compuestos por las etapas II y IV, y I y III, respectivamente.

Evolución volcánica

La Etapa I fue formada entre 1.300 y 700 ka, ocurre en el flanco sur inferior del volcán sobre un basamento ignimbrito Mioceno (Rivera et al., 2020). Para esta etapa sólo se reconocieron flujos de lava afectados en mayor manera por erosión glacial y fluvial, estando cubierta en gran medida por los flujos de la etapa III. La Etapa II ocurre entre 700 y 500 ka, y surge principalmente en el edificio norte, correspondiendo a lava erosionada y flujos piroclásticos de < 2 m de espesor afectados por alteración hidrotermal, principalmente en los flancos inferiores de este edificio, esta etapa sufre un colapso parcial del flanco durante su evolución que resulta en una avalancha de depósitos de escombros volcánicos que elimina parte de esta etapa (Godoy et al. 2022). La Etapa III fue formada entre 500 y 300 ka en el edificio sur, y en su parte superior se reconocen al menos dos respiraderos que generaron los flujos de lava.

Finalmente, la Etapa IV, formada entre 300-120 ka, se conforma por flujos de lava expuestos en los flancos norte del volcán, superpuestos a los de la Etapa II y afectados por la alteración hidrotermal del edificio Norte.

Geoquímica

Las composiciones de elementos mayores fueron determinadas por Godoy et al. (2022), utilizando un espectrómetro Panalytical Axios de fluorescencia de rayos X de dispersión por longitud de onda, y las abundancias de elementos traza fueron determinadas con un espectrómetro de masas con cuadrupolo ThermoFisher Xseries II.

Estos datos geoquímicos indican que, para contenidos de SiO₂ similares, las lavas de la Etapa II (700–500 ka) y la Etapa IV (300–120 ka) muestran principalmente Al₂O₃, Na₂O más bajos, y mayores concentraciones de FeO, MgO y TiO₂ con respecto a los de la Etapa I (1.300–700 ka) y Etapa III (500–300 ka). Estas diferencias sugieren plagioclasa dominante y fases minerales ricas en Fe-Mg (Godoy et al. 2022).

Las lavas de este volcán, que varían de andesita a dacita en composición, muestran una disminución en el contenido de FeO, MgO, Al₂O₃ y CaO a mayor contenido de sílice. Por otro lado, los contenidos de K₂O y Na₂O muestran un aumento disperso con variación de SiO₂. El contenido de Rb aumenta con el contenido de SiO₂, mientras que el Sr en general disminuye con la diferenciación, teniéndose un menor contenido en las Etapas II y IV que en las Etapas I y III. Por otro lado, el contenido de Ba y Cr no muestra una tendencia particular con la diferenciación.

La relación de LREE/HREE (e.g., La/Yb y Sm/Yb) y Sr/Y para las lavas del volcán Azufre son más bajas que la mayoría de los productos erupcionados del Pleistoceno en los Andes Centrales. Las lavas del volcán Azufre muestran relaciones Eu/Eu* particularmente bajas correlacionadas negativamente con SiO₂, con valores más altos para las Etapas I y III que las de las Etapas II y IV SiO₂ (Godoy et al. 2022).

Petrografía

Se tiene un total de 15 cortes pulidos transparentes representativas de las 4 unidades volcánicas definidas por Godoy et al. (2022). En su mayoría, el análisis petrográfico en este trabajo es consistente con lo realizado por Godoy et al. (2022). En todas las muestras de lava se observa textura porfídica, con un volumen de fenocristales que varía de 25 a 40 % y cuya longitud puede alcanzar hasta los 4 mm. La plagioclasa es el fenocristal más abundante en todas las muestras, constituyendo el 15%-30% del volumen de ensamblaje mineral, coexistiendo con las demás fases mineralógicas. Estas alcanzan un tamaño de hasta 3,5 mm y muestran características variables que incluyen textura de tamiz, zonificación oscilatoria, maclado y texturas reabsorbidas. En menores proporciones se observan fenocristales de ortopiroxeno, clinopiroxeno, biotita, hornblenda, olivino, cuarzo y/o minerales opacos. Hay un mayor contenido de olivino y ortopiroxeno en lavas menos evolucionadas (<60 wt% de SiO₂) del edificio del norte (etapas II y IV), mientras que las del edificio del sur (etapas I y III) muestran mayor contenido de anfíboles en composiciones similares de SiO₂. Los fenocristales de olivino se observaron en lavas del edificio norte con <61 wt% de SiO₂, coexistiendo con plagioclasa, orto- y clinopiroxeno. Estos pueden alcanzar los 2 mm de longitud y el 5% volumen de la muestra, pudiendo presentar textura esquelética. El ortopiroxeno y el clinopiroxeno son las fases minerales ferromagnesianas más comunes (hasta un 15% vol.), pudiendo alcanzar hasta 2 mm de longitud de fenocristal. Ambas fases mineralógicas se observan en una amplia gama de contenido de SiO₂, sin embargo, el contenido de fenocristales disminuye con la diferenciación. Se asocian frecuentemente con glomerocristales formadores de plagioclasa ± biotita ± anfíboles. Se observan anfíbol en lavas con un contenido de SiO₂ mayor a 62 wt%, siendo más abundantes en las del edificio sur (etapas I y III) que en las del edificio norte. Cuando está presente, el anfíbol puede alcanzar los 4 mm de longitud y constituye hasta el 15% en volumen de los fenocristales, a menudo con características de desequilibrio de texturas de ruptura (bordes de reacción) con minerales opacos, plagioclasa, ortopiroxeno.

Los fenocristales de biotita son escasos, pero cuando está presente este mineral puede alcanzar hasta el 15% del volumen de las muestras, con longitudes de hasta 4 mm que coexisten principalmente con fases de anfíboles, plagioclasa y clinopiroxeno. Algunos muestran bordes oxidados (oxibiotita). El cuarzo, si está presente, alcanza hasta 3 mm de longitud. Esta fase mineralógica genera un ensamblaje con plagioclasa $\pm$ anfíboles $\pm$ clinopiroxeno $\pm$ biotita.

Entre los minerales accesorios, los óxidos de Fe-Ti pueden alcanzar hasta el 2% en volumen de las muestras, mientras que el apatito y el circón son escasos. Se observan glomerocristales de hasta 5 mm de diámetro, texturas están constituidas por cúmulos de clinopiroxeno + plagioclasa $\pm$ ortopiroxeno $\pm$ anfíboles.

Las texturas minerales como la zonificación oscilatoria en plagioclasa, olivino esquelético y reabsorción en cristales de cuarzo, pueden indicar disequilibrios térmicos y químicos para los sistemas volcánicos (Streck, 2008), características que se observan en casi todas las muestras del Volcán Azufre e igualmente son reconocidas en otros volcanes de la ZVC dentro de la proyección superficial del APMB (e.g., Feeley y Davidson, 1994; Godoy et al., 2018; González-Maurel et al., 2019; Taussi et al., 2019). Las texturas oscilatorias de las plagioclases del volcán Azufre, sugieren inyecciones repetidas de magma fresco y máfico en una cámara de magma previamente diferenciado y enfriado, causando la reabsorción de plagioclasa ya cristalizada (e.g., Feeley y Davidson, 1994). De manera similar, las texturas esqueléticas de olivino reabsorbidas indican que se produjeron disequilibrios térmicos y/o químicos durante toda la evolución magmática del volcán (e.g., Mattioli et al., 2006; González-Maurel et al., 2019).

Termobarometría

Godoy et al. (2022) estimó valores preliminares para el edificio norte utilizando la microsonda electrónica JEOL Superprobe JXA-8100 y espectrómetros de dispersión de longitud de onda (WDS). Los rangos de temperatura van desde 1000 °C hasta 1060 °C (± 39 °C), y las presiones de fraccionamiento entre 350 y 470 (± 370) MPa, mientras que la termobarometría de anfíbol indicó presiones de fraccionamiento de magma entre 140 y 220 ($\pm 11,5\%$) MPa, con temperaturas entre 810 °C a 890 °C ($\pm 23,5$ °C). Estas condiciones termobarométricas son similares a las estimaciones realizadas en otros volcanes de la cadena volcánica Azufre-Inacaliri (e.g., Gorini et al., 2018). Cabe mencionar que, la evolución del volcán Azufre llena la brecha de tiempo de actividad volcánica entre el crecimiento del Complejo Volcánico Apacheta-Aguilucho y el emplazamiento de los jóvenes domos dacíticos que rodean el Campo Geotérmico Cerro Pabellón (Godoy et al. 2022). Esto posiblemente revela un sistema magmático activo de larga duración (más de 1 Ma) en los sectores más nororientales de la Cadena Volcánica Azufre-Inacaliri y entrega nuevas limitaciones en cuanto a la longevidad de las regiones fuente de calor de la alta entalpía Campo Geotérmico Cerro Pabellón, posiblemente abriendo nuevas perspectivas en la exploración geotérmica de esta zona, lo cual demuestra la importancia de este trabajo.

Selección de muestras

En cuanto a los resultados por el momento, de los 15 cortes mencionados anteriormente, se seleccionaron los más representativos para cada etapa del Volcán Azufre para así favorecer su posterior análisis en microsonda electrónica (EPMA):

17-10 / Etapa I: Corresponde a una roca de textura porfídica, muy levemente alterada, que presenta un 60% de masa fundamental compuesta por vidrio, opacos y microlitos. Un 40% corresponde a cristales de tamaño 0,2 mm o mayor. De este 40% de fenocristales, un 60% son plagioclases rotas, principalmente tabulares de hasta 4,5 mm, subhedrales a euhedrales, reconociéndose textura sieve en las de mayor tamaño. A pesar de que igualmente hay zonadas, predominan las macladas. Un 20% corresponde a cristales subhedrales a euhedrales de anfíbol y biotita oxidada de hasta 3,5 mm, mientras que los piroxenos se encuentran en un 15%, en cristales subhedrales de hasta 0,5 mm. Igualmente se observan olivinos rotos subhedrales de tamaño menor a 1 mm, con una abundancia menor al 5%. Se identifican glomerocristales de hasta 5 mm con la asociación mineral mencionada anteriormente, además de intercrecimiento entre plagioclasa y biotita. Finalmente, un 5% de fenocristales corresponde a opacos. Se tiene apatito en los cristales de plagioclases como mineral accesorio.

16-012 / Etapa II: Corresponde a una roca de textura porfídica, muy levemente alterada, con un 65% de masa fundamental compuesta por vidrio, opacos y microlitos y un 35% de fenocristales. 50% de los fenocristales corresponde a plagioclases subhedrales a euhedrales de hasta 2 mm, y un 15% a cristales de biotita oxidada y anfíbol subhedrales de hasta 1.5mm. Los piroxenos abundan más en esta etapa en comparación, habiendo un 25% de cristales subhedrales de hasta 2 mm. Igualmente hay olivinos subhedrales de hasta 1 mm y opacos, ambos en proporciones similares, teniendo una abundancia menor a un 5%. Se observa glomerocristal de 5 mm de diámetro, con cristales de plagioclasa, piroxenos, anfíbol y opacos. Se tiene apatito en los cristales de plagioclases como mineral accesorio.

17-02 / Etapa III: Corresponde a una roca de textura porfídica, con alteración moderada, conservando los ferromagnesianos. Presenta un 80% de masa fundamental compuesta por vidrio, opacos y microlitos. Del 20% de fenocristales, un 45% son plagioclases subhedrales a euhedrales de hasta 2 mm, encontrándose algunas sericitizadas. En general dominan las tabulares menores a 1 mm. Uno de los fenocristales 30% son cristales alargados prismáticos de biotita de hasta de hasta 2 mm. 20% son piroxenos y anfíboles subhedrales de hasta 3 mm, muy rotos. Con un 5% siendo opacos. Se tiene un glomerocristal de 5mm de toda la asociación mineral anterior, excluyendo los opacos. Se tiene apatito en los cristales de plagioclases como mineral accesorio.

16-03 / Etapa IV: Corresponde a una roca de textura porfídica, con alteración muy incipiente y oxidación alterando a los cristales de biotita. Presenta un 60% de masa fundamental compuesta por vidrio, opacos y microlitos. Del 40% de los fenocristales, un 60% corresponden a plagioclases macladas y zonadas alteradas a arcilla, subhedrales a euhedrales, de hasta 6mm. Debido al grosor del cristal las cualidades de piroxenos, anfíboles y olivinos son indistinguibles, componiendo un 25% de los cristales, subhedrales a euhedrales. Un 10% son opacos en esta muestra alcanzan un tamaño de hasta 4.5mm. Se encuentran algunos cristales de cuarzo embayado/reabsorbido de hasta 1.5mm, en proporción menor al 5%. Se tiene apatito en los cristales de plagioclases como mineral accesorio.

Trabajo a realizar

En base a lo ya descrito, se sabe que el volcán Azufre está actualmente caracterizado a detalle, y en el trabajo a realizar se espera profundizar aún más realizando un estudio en cuanto a las condiciones pre-eruptivas de cada etapa. Se realizará un análisis en microsonda electrónica (EPMA) de los cortes transparentes descritos anteriormente, y cuando se tengan los resultados de este análisis, se podrán estimar las condiciones de cristalización utilizando la termobarometría (Putirka, 2008). Con esto se espera estimar el contexto pre-eruptivo del volcán Azufre, obteniendo valores de temperatura, presión y profundidad de cristalización para cada etapa, y finalmente unificando toda la información se propondrá un modelo evolutivo del mismo.

Esto a su vez contribuirá a una mayor comprensión de los sistemas magmáticos que actuaron en la Cadena Volcánica Azufre-Inacaliri y a la ZVC en general.

Palabras Clave: APVC, Volcán Azufre, ZVC.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT Iniciación N°11200013.

Agradecimientos: Agradezco a los profesores Osvaldo y Benigno por permitirme colaborar en el presente trabajo. Espero poder contribuir de manera significativa y aprender mucho en esta experiencia.

Referencias:

- Taussi, M. et.al. 2019b. The upper crustal magma plumbing system of the Pleistocene Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex area (Altiplano Puna, northern Chile) as inferred from the erupted lavas and their enclaves.
- González-Maurel, O. et.al. 2019b. The great escape: Petrogenesis of low-silica volcanism of Pliocene to Quaternary age associated with the Altiplano-Puna Volcanic Complex of northern Chile (21°10'-22°50'S).
- Godoy, B., Taussi, M., González-Maurel, O., Hübner, D., Lister, J., Sellés, D., Roux, P. L., Renzulli, A., Rivera, G., & Morata, D. (2022). Evolution of the Azufre volcano (northern Chile): Implications for the Cerro Pabellón Geothermal Field as inferred from long lasting eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 423, 107472.
- Chmielowski, J. et.al. 1999. The central Andean Altiplano-Puna magma body.
- Gorini, A. et.al. 2018. Application and reliability of calcic amphibole thermobarometry as inferred from calc-alkaline products of active geothermal areas in the Andes.
- Rivera, G. et.al. 2020. Volcanic and Tectonic Evolution of Azufre–Inacaliri Volcanic Chain and Cerro Pabellón Geothermal Field (Northern Chile).
- de Silva, S.L., 1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology* 17 (12), 1102–1106.
- de Silva, S. et.al. 2006. Large-scale silicic volcanism—The result of thermal maturation of the crust.
- de Silva, S.L., Gosnold, W.D., 2007. Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up.
- Putirka, K. D. 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems.
- Streck, M.J., 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes.
- Feeley, T.C., Davidson, J.P., 1994. Petrology of calc-alkaline lavas at Volcán Ollagüe and the origin of compositional diversity at Central Andean stratovolcanoes.
- Tibaldi, A., Bonali, F.L., 2018. Contemporary recent extension and compression in the central Andes.

Geoquímica y petrogénesis del volcanismo Triásico Superior ubicado entre los 34° Y 37° S, Chile

Noemi Alarcón Márquez¹, Pablo Rossel Estrada¹

(1) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, autopista Concepción-Talcahuano 7100, Concepción, Chile

La evolución tectonomagmática del borde suroccidental de Gondwana durante el Ciclo Pre-Andino ha sido objeto de múltiples estudios sin tener certeza aún de las condiciones que lo gobernaron. En Chile, entre los 34° y 37° se han reconocido 3 unidades Triásicas en depocentros marino-continentales que contienen una serie de lavas de carácter subalcalino: Crucero los Sauces (cuenca Vichuquén-Curepto-Hualañé), Estratos de Pocillas (cuenca de Pocillas) y miembro Santa Juana (formación Santa Juana). Los datos geoquímicos muestran que Formación Crucero los Sauces y Estratos de Pocillas exhiben típicas firmas de ambientes de arco mientras que Santa Juana exhibe firmas afines a la presencia de un slab break-off. La diferencia entre las firmas de estas unidades, la ausencia de un arco documentado para el ciclo pre-Andino y el alto contenido de sílice en las rocas de formación Crucero los Sauces y estratos de Pocillas pone en duda la existencia de subducción a estas latitudes durante el Mesozoico. Los resultados obtenidos sugieren que los magmas que dieron origen a las rocas de estas tres formaciones se formaron en condiciones similares, con diferentes grados de contaminación cortical durante su ascenso, que incluye, en el caso de Estratos de Pocillas y Crucero los Sauces, contaminación con corteza Paleozoica con firmas de subducción. Este proceso les habría heredado las firmas de arco documentadas. Por su parte, el magma que dio origen a las rocas de formación Santa Juana no se habría contaminado con esta corteza durante su ascenso conservado su firma original de un ambiente slab break off. Esto sugiere que las cuencas formadas en el periodo pre-Andino fueron depocentros aislados y no continuos como se creía anteriormente y que existió una segmentación N-S a lo largo del margen durante el Mesozoico.

Palabras Clave: slab break off, volcanismo triásico.

Financiamiento: Universidad Andrés Bello, Departamento de Ingeniería.

Petrological processes involved in the formation of the mantle-crust transition zone of Taitao ophiolite, Aysén, Chile

Maite Alvear Kayiza¹, Manuel Schilling¹, Gaëlle Plissart¹, Alexandre Corgne¹, Kuan-Yu Lin², Norikatsu Akizawa³, Jessica Warren², Emilio González Valenzuela¹, Catalina Marín¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(2) University of Delaware, Institute of Earth Sciences, Delaware, USA

(3) The University of Tokyo, Department of Ocean Floor Geoscience, Atmosphere and Ocean Research Institute, Kashiwa, Japan

Chemical heterogeneities have been recognized in the suboceanic mantle at very different scales, as a product of variable degrees of melt depletion, metasomatism, refertilization and lithospheric recycling. However, studying the suboceanic mantle is limited by its difficult access, which is why ophiolites represent an opportunity to access the lithological diversity of the upper suboceanic mantle, with spatial and structural context. The mantle-crust boundary recognized in other ophiolites (Oman ophiolite, Andaman ophiolite, Naga Hills ophiolite) corresponds to the petrological Moho transition zone, made of a pseudo-stratification of mainly dunite along with other ultramafic lithologies such as peridotites, pyroxenites and chromitites (Boudier & Nicolas, 1995; González-Jiménez et al., 2014; Arai & Miura, 2015), with frequent foliation parallel to the transition zone. In this domain, evidence of the interaction between the upper mantle peridotites and partial melts are preserved, since these melts ascend through channels generated by dissolution, crystallization, and metasomatism processes. Dunites could also have a replacement origin due to the reaction between harzburgites with silica-undersaturated melts, that would generate pyroxene dissolution and crystallization and then accumulation of olivine (Kelemen et al., 1995; Akizawa & Arai, 2009; Abily & Ceuleneer, 2013). Thus, Moho transition zone studies allow assessment of the diversity of melts that are extracted from the mantle source and the petrological processes involved during their ascent to the base of the oceanic crust.

This work focuses on the foliated and pseudostratified ultramafic rocks collected from the Taitao ophiolite in 2022. This ophiolite is located on the Taitao Peninsula, approximately 50 km south of the Chile triple junction, and likely samples the source mantle related to the Chile Ridge. It is a Penrose-type ophiolite composed by a sequence that includes, from base to top, ultramafic rocks, gabbro, diabase dikes, pillow lavas, volcanic breccias, and clastic strata. The formation and emplacement of the oceanic lithosphere took place 6 Ma ago, due to the collision and subduction of a segment of the Chile ridge beneath the South American plate (Anma et al., 2006). The outcrop selected for this study is part of the Moho transition zone, which was determined based on observations made in studies of other ophiolites (Boudier & Nicolas, 1995; Akizawa & Arai, 2009; Rospabé et al., 2017; Abdullah et al., 2018), and is made up of an intercalation of centimeters thick layers of different ultramafic lithologies. Some of these rocks were previously described by Nelson et al. (1993) as a layered cumulate of lherzolite and dunite. However, no specific studies about the Moho transition zone of Taitao ophiolite has been done to date. In this work, we investigate the petrology and geochemistry of this upper mantle section, focusing on understanding the partial melting processes and small scale rock-melt reactions taking place at the mantle-crust boundary.

The methodology consists of petrological characterization of 23 samples using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and electronic microprobe (EMPA), to identify the primary mineral associations and textures, differentiate it from secondary mineralogy, and look for evidence of melt percolation such as recrystallization of olivine, crystallization of secondary pyroxenes and interstitial plagioclase. In addition, major and trace element whole-rock composition will be determined by x-ray fluorescence (XRF).

Preliminary results obtained by optical microscopy and SEM indicate a broad lithological diversity, composed of dunite, chromite-rich dunite, harzburgite, lherzolite and clinopyroxenite, and some foliation parallel to the pseudostratification. The level of serpentinization of the samples ranges from 2 to 5, according to the scale proposed by Birner et al. (2016), which means that samples are moderately to highly serpentinized. It has been possible to identify the primary mineralogy consisting essentially of olivine, clinopyroxene, orthopyroxene, spinels and sulfides, with several inclusions of olivine and pyroxenes in chromites and silicates. Recrystallization textures have been observed in olivine, along with secondary and interstitial orthopyroxene and clinopyroxene. Also, many alteration minerals have been identified, such as serpentine, chlorite, amphibole, calcite, sericite, brucite, magnetite and rutile. Whole-rock analysis is currently being carried out and will be presented at the meeting.

This work provides new information for understanding the petrological processes that occur within the modern upper mantle and that led to the formation of the mantle-crust transition zone.

Keywords: Taitao Ophiolite, mantle-crust transition zone, Moho transition zone, melt percolation, melt-rock interaction

Financing: This work is financed by FONDECYT regular 1211820

References:

- Abdullah, S., Misra, S., Ghosh, B. (2018). Melt-rock interaction and fractional crystallization in the Moho transition Zone: evidence from the cretaceous Naga Hills Ophiolite, North-East India. *Lithos*, 322, 197-211.
- Abily, B., Ceuleneer, G. (2013). The dunitic mantle-crust transition zone in the Oman ophiolite: Residue of melt-rock interaction, cumulates from high-MgO melts, or both? *Geology*, 41(1), 67-70.
- Akizawa, N., Arai, S. (2009). Petrologic profile of peridotite layers under a possible Moho in the northern Oman ophiolite: An example from Wadi Fizh. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 104(6), 389-394.
- Anma, R., Armstrong, R., Danhara, T., Orihashi, Y., Iwano, H. (2006). Zircon sensitive high mass-resolution ion microprobe U-Pb and fission-track ages for gabbros and sheeted dykes of the Taitao ophiolite, Southern Chile, and their tectonic implications. *Island Arc*, 15(1), 130-142.
- Arai, S., Miura, M. (2015). Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges. *Lithos*, 232, 143-149.

- Boudier, F., Nicolas, A. (1995). Nature of the Moho transition zone in the Oman ophiolite. *Journal of Petrology*, 36(3), 777-796.
- González-Jiménez, J. M., Griffin, W. L., Proenza, J. A., Gervilla, F., O'Reilly, S. Y., Akbulut, M., Pearson, N.J., Arai, S. (2014). Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The crystallization of chromitites. *Lithos*, 189, 140-158.
- Kelemen, P.B., Shimizu, N., Salters, V.J.M. (1995). Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature* 375, 747-753.
- Nelson, E., Forsythe, R., Diemer, J., Allen, M., Urbina, O. (1993). Taitao ophiolite: A ridge collision ophiolite in the forearc of southern Chile (46 S). *Andean Geology*, 20(2), 137-165.
- Rospabé, M., Ceuleneer, G., Benoit, M., Abily, B., Pinet, P. (2017). Origin of the dunitic mantle-crust transition zone in the Oman ophiolite: The interplay between percolating magmas and high-temperature hydrous fluids. *Geology*, 45(5), 471-474.

Tasa de descompresión durante erupciones explosivas: Indicaciones derivadas de la modelación numérica

Álvaro Aravena¹⁻², Raffaello Cioni³, Mattia de' Michieli Vitturi⁴, Augusto Neri⁴

(1) Universidad Católica del Maule, Departamento de Biología y Química, Facultad de Ciencias Básicas, Talca, Chile

(2) Millennium Institute on Volcanic Risk Research – Ckelar Volcanoes, Antofagasta, Chile

(3) Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, Florencia, Italia

(4) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa, Pisa, Italia

La tasa de descompresión que experimentan los magmas durante las fases de ascenso en el conducto afecta la dinámica de exsolución de volátiles, el crecimiento de burbujas y los mecanismos de fragmentación, influenciando críticamente la transición efusiva-explosiva durante erupciones volcánicas y el estilo eruptivo resultante (e.g., Cassidy et al., 2018). En consecuencia, la tasa de descompresión ha representado un parámetro de especial interés en volcanología durante las últimas décadas (Alfano et al., 2012; Pardo et al., 2014), y se han desarrollado distintas estrategias y metodologías para estimarla (Miwa y Geshi, 2012; Toramaru, 2006). Sin embargo, aunque estos métodos han sido ampliamente utilizados para analizar la dinámica de descompresión del magma durante distintas erupciones explosivas (e.g., Alfano et al., 2012; Shea et al., 2012; Pardo et al., 2014), el significado físico de estos resultados sigue siendo incierto, sobre todo considerando que algunas de las estimaciones de tasa de descompresión reportadas en la literatura son muy superiores a los valores predichos a partir del uso de modelos numéricos, incluso si se tiene en cuenta la fricción en las paredes y el efecto inercial.

En este estudio, a través del modelamiento numérico de conductos volcánicos (de' Michieli Vitturi y Aravena, 2021), se estudia en detalle cómo evoluciona la tasa de descompresión durante el ascenso magmático, considerando condiciones de entrada variable dentro de rangos predefinidos, capaces de incluir distintas composiciones, temperaturas y condiciones geométricas del conducto. Además de estudiar las tasas de descompresión esperadas durante las fases de crecimiento de burbujas, que es el período en el que esta variable puede registrarse en los productos volcánicos resultantes, se analiza la existencia/ausencia de correlaciones con los parámetros de entrada y con parámetros eruptivos de primer orden para determinar el estilo eruptivo, como el flujo de masa, la velocidad de salida y la presión de salida.

Palabras Clave: tasa de descompresión, modelamiento numérico, conductos volcánicos, erupciones explosivas.

References:

- Alfano, F., Bonadonna, C., & Gurioli, L. (2012). Insights into eruption dynamics from textural analysis: the case of the May 2008, Chaitén eruption. *Bulletin of Volcanology*, 74, 2095-2108.
- Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K., & Bachmann, O. (2018). Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles. *Nature Communications*, 9(1), 2839.
- de Michieli Vitturi, M., & Aravena, Á. (2021). Numerical modeling of magma ascent dynamics. In: *Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 239-284). Elsevier.
- Miwa, T., & Geshi, N. (2012). Decompression rate of magma at fragmentation: Inference from broken crystals in pumice of vulcanian eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 227, 76-84.
- Pardo, N., Cronin, S. J., Wright, H. M., Schipper, C. I., Smith, I., & Stewart, B. (2014). Pyroclast textural variation as an indicator of eruption column steadiness in andesitic Plinian eruptions at Mt. Ruapehu. *Bulletin of Volcanology*, 76, 1-19.
- Shea, T., Gurioli, L., & Houghton, B. F. (2012). Transitions between fall phases and pyroclastic density currents during the AD 79 eruption at Vesuvius: building a transient conduit model from the textural and volatile record. *Bulletin of volcanology*, 74, 2363-2381.
- Toramaru, A. (2006). BND (bubble number density) decompression rate meter for explosive volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(3-4), 303-316.

Magmatic addition rates differentiate periods of steady-state versus flare-up magmatism in the Central Andean arc

Daniel Bertin¹⁻², Shanaka de Silva³, Jan Lindsay², Shane Cronin², Pablo Caffè⁴, Charles Connor⁵, Pablo Grosse⁶⁻⁷, Walter Báez⁸, Emilce Bustos⁸, Robert Constantinescu⁵

- (1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Edición y Biblioteca, Santiago, Chile
 (2) University of Auckland, School of Environment, Faculty of Science, Auckland, New Zealand
 (3) Oregon State University, College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Corvallis, Oregon, United States
 (4) CONICET - Universidad Nacional de Jujuy, Instituto de Ecorregiones Andinas & Instituto de Geología y Minería, San Salvador de Jujuy, Argentina
 (5) University of South Florida, School of Geosciences, Tampa, Florida, United States
 (6) CONICET, Buenos Aires, Argentina
 (7) Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina
 (8) IBIGEO, UNSa-CONICET, Instituto de Bio y Geociencias del NOA, Salta, Argentina

Cordilleran arcs are built by long periods of normal, steady-state magmatism periodically punctuated by transient high-flux magmatic episodes or flare-ups (e.g., de Silva, 2008). Such flare-ups, commonly manifested as periods of prodigious caldera- and ignimbrite-forming eruptions, result from geodynamic perturbations that cause elevated rates of magma addition to the crust (e.g., Paterson and Ducea, 2015). Questions remain, however, about how magmatic addition rates quantitatively compare between steady-state and flare-up modes of arc magmatism, and how long after the major geodynamic perturbation the flare-up begins. To investigate these issues, here we compute new estimates of erupted volumes over the last 35 Myr for the 22.5-29°S segment of the Central Andes (Bertin et al., 2023), based on a new volcanic geospatial database (Bertin et al., 2022).

Our results suggest that 27.6 to $30.1 \times 10^3 \text{ km}^3$ of Dense Rock Equivalent magma erupted over that period. Around 44% occurs within ignimbrite sheets and ~56% in other diverse volcanic deposits, almost equally distributed north and south of 25°S. Considering the plateau-forming ignimbrites separately, we infer eruption rates between 2 and 128 km^3 per 10 kyr. Smaller-scale eruption products, on the other hand, have eruption rates of up to 25 km^3 per 10 kyr, although they average ~4.5 km^3 per 10 kyr over the last 35 Myr; these eruption rates correlate well with those from the large-volume ignimbrite-forming events for some of the time analysed, which seems to reflect the period when large and shallow silicic magma reservoirs were absent (cf. de Silva and Gosnold, 2007). Magmatic addition rates, derived by summing estimated intrusive and extrusive volumes, average to ~0.5 km^3 per km of arc per 10 kyr during the Central Andean flare-up, at least an order of magnitude higher compared to steady-state conditions.

Episodic flare-ups are ignited by major geodynamic changes. In the case of the Central Andes, the subduction of the Juan Fernández Ridge seems to be the most likely cause (e.g., Kay and Coira, 2009), with respect to which we estimate a lag time of ~8–12 Myr. The onset of the Central Andean flare-up seems to follow the southward subduction of the ridge, so our study suggests that, should this trend continue to the south, the 26–29°S segment of the Central Andes is likely to experience a flare-up in the next few Myr. In that segment, some large-scale crustal anomalies detected at mid-crustal depths, interpreted as partial melt bodies (e.g., Ward et al., 2017), might be an early signal of this future flare-up.

Keywords: Central Andes, Chile, Argentina, Arc magmatism, Crustal growth.

Financing: CONICYT-Becas Chile, Grant 72170365 University of Auckland, New Zealand.

Acknowledgments: DB acknowledges CONICYT-Becas Chile for a PhD scholarship and the University of Auckland for funding support.

References:

- Bertin, D., Lindsay, J.M., Cronin, S.J., de Silva, S., Connor, C.B., Caffè, P.J., Grosse, P., Báez, W., Bustos, E., Constantinescu, R., 2022. Volcanic geospatial database of the Chilean-Argentinian segment (22.5-29°S) of the Central Volcanic Zone of the Andes. The University of Auckland. Dataset. <https://doi.org/10.17608/k6.auckland.16894903.v3>.
- Bertin, D., de Silva, S.L., Lindsay, J.M., Cronin, S.J., Caffè, P.J., Connor, C., Grosse, P., Báez, W., Bustos, E., Constantinescu, R., 2023. Magmatic addition rates differentiate periods of steady-state versus flare-up magmatism in the Central Andean arc. *Communications Earth and Environment*, 4:75. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00744-2>.
- de Silva, S.L., 2008. Arc magmatism, calderas, and supervolcanoes. *Geology*, 36(8): 671-672. <https://doi.org/10.1130/focus082008.1>.
- de Silva, S.L., Gosnold, W.D., 2007. Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1-4): 320-335. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.015>.
- Kay, S.M., Coira, B.L., 2009. Shallowing and steepening subduction zones, continental lithospheric loss, magmatism, and crustal flow under the Central Andean Altiplano-Plateau. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.), *Backbone of the Americas: Plateau uplift, shallow subduction and ridge collision*. Geological Society of America Memoir, 204: 229-259. [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(11\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(11)).
- Paterson, S.R., Ducea, M.N., 2015. Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. *Elements*, 11: 91-98. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.91>.
- Ward, K.M., Delph, J.R., Zandt, G., Beck, S.L., Ducea, M.N., 2017. Magmatic evolution of a Cordilleran flare-up and its role in the creation of silicic crust. *Scientific Reports*, 7: 9047. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09015-5>.

Condiciones pre-eruptivas de los productos asociados a la *Ignimbrita Neltume*, Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (39°55'S / 72°02'W), Zona Volcánica Sur, Chile

Rodrigo Bustos Arancibia¹, Eduardo Morgado Bravo¹

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

Dentro de la corteza continental, existen zonas locales donde los productos magmáticos del manto se emplazan en la corteza generando así reservorios magmáticos, por lo que el estudio de condiciones intensivas involucradas en la cristalización del magma dentro del reservorio magmático, permiten comprender de mejor manera los diferentes escenarios previos a un evento volcánico.

El Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMCH; 39°55'S / 72°02'O) es un volcán compuesto situado en la Región de los Ríos, en la Provincia de Valdivia, en la comuna de Panguipulli, Chile. Este complejo volcánico ocupa el séptimo lugar en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile (SERNAGEOMIN, 2019). Se encuentra ubicado en la Zona Volcánica Sur Central. El Complejo volcánico Mocho-Choshuenco dentro de su historia ha tenido erupciones altamente explosivas en el Holoceno, las que se han caracterizado por generar productos volcánicos de alcance regional, como la Ignimbrita Neltume, cuyos productos volcánicos llegaron hasta ~ 70 km al Norte. Se cree que esta ignimbrita se formó a partir del colapso de la columna eruptiva, generando una corriente de densidad piroclástica (Moreno y Lara, 2007). Adicionalmente, mediante la datación por radiocarbono ¹⁴C, se ha determinado una edad de ~ 10.700 años para este evento y la generación de estos productos. Esta ignimbrita está compuesta, principalmente, por depósitos de pómez de composición dacítica, en las cuales se compone principalmente de plagioclasas, piroxenos, Ilmenita, Magnetita y Óxidos Fe-Ti. Estos depósitos también están poco estudiados, lo que presenta un riesgo continuo tanto para las infraestructuras locales debido a su proximidad a las poblaciones, las cuales están constantemente expuestas a este peligro, los cuales podrían afectar localidades adyacentes a los cauces principales que descienden el complejo volcánico.

La localización de fuente sísmica de actividad VT bajo el CVMCH sugiere que el reservorio magmático se encuentra a una profundidad máxima de ~ 4.5 km. Además, mediante análisis de química mineral y termobarometría, se espera que las temperaturas oscilen entre 860 y 900°C, con un buffer de fO_2 cercano al valor de ΔNNO .

Palabras Clave: Zona Volcánica Sur, termobarometría, Fugacidad de oxígeno.

Financiamiento: FONDECYT Iniciación 2023 (N° 11230197).

Referencias:

- Moreno H. y Lara L., (2007). Geología del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Carta geológica de Chile. N°107.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2019). Nuevo Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/07/2Ranking-2019_Tabla_Final.pdf.

Resultados preliminares del estudio petrográfico de los últimos productos eruptivos del volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota, Chile

Esteban Enrique Cifuentes Lobos¹⁻², Verónica Oliveros¹⁻², Pablo Salas Reyes¹⁻²

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

El volcán Guallatiri es un estratovolcán activo ubicado en la región de Arica y Parinacota, Chile. Perteneciente a la Zona Volcánica Central (ZVC). Es el segundo volcán más activo del norte de Chile con evidencias de actividad que datan del Pleistoceno tardío hasta el Holoceno y el tercero más peligroso de la región, destacando amenazas de lahares, flujos piroclásticos y caídas de tefra, pudiendo afectar a diversas localidades cercanas, dependiendo del fenómeno y de la dirección del viento que predomine en determinada época del año (Jorquera et al., 2019).

Este centro eruptivo muestra una evolución que puede ser comprendida en siete unidades, siendo las primeras de carácter principalmente efusivo, donde dominan los flujos de lavas, hasta llegar a estadios más juveniles de carácter principalmente explosivo, con domos de lava, flujos piroclásticos y depósitos de caída (Sepúlveda et al., 2021). Uno de los pilares de este estudio es complementar la investigación realizada hasta la fecha en este volcán.

Se presentan los resultados preliminares del estudio petrográfico de los productos eruptivos de las últimas erupciones del volcán Guallatiri, correspondientes a la unidad Guallatiri 6, además de lavas provenientes de los Domos Tinto y Sur. Estos productos incluyen depósitos de caída, flujos piroclásticos y los domos recién mencionados, todos de edad holocena (Sepúlveda et al., 2021; Watts et al., 2014). La investigación se centra en la búsqueda de evidencias de mecanismos y gatillantes eruptivos con el objetivo de adquirir una mejor comprensión de los procesos magmáticos y condiciones que desencadenan erupciones volcánicas. Estas incluyen texturas de desequilibrio, inclusiones máficas, inclusiones fundidas, entre otras evidencias petrográficas.

Se sigue una metodología que combina trabajo de terreno, muestreo petrográfico y observación de cortes transparentes al microscopio, realizándose muestras de diferentes productos eruptivos de las erupciones más recientes del volcán Guallatiri.

En terreno se observó depósitos ubicados en la quebrada del río Caullatiri, en el flanco suroeste del volcán y a unos dos kilómetros al noreste del pueblo de Guallatiri, los que conforman un afloramiento de unos 12 metros de espesor aproximadamente, compuesto por capas de flujos piroclásticos y depósitos de caída. De las distintas capas se muestreó las dos más superiores, las que fueron descritas como: una capa de unos 3 metros de espesor compuesta por varios niveles milimétricos a centímetros con granulometrías variables, que van entre 2 mm a 3 cm, pero bien seleccionados dentro de estos mismos, además de la ocurrencia de clastos subredondeados que varían entre unos 4 y 25 cm que forman intercalaciones subordinadas dentro de la capa. La composición de los clastos corresponde a un 70% de fragmentos líticos de color oscuro a grisáceo, 20% de fragmentos líticos de color rojizo y un 10% de pómez. Matriz tamaño ceniza fina a gruesa con composición similar. Este nivel subyace a una capa de unos 4 metros de espesor, clastosoportada, con clastos subredondeados a subangulosos que varían entre 5 milímetros a 12 centímetros ocasionalmente, y están compuestos por un 80% de pómez, 15% de fragmentos líticos de color oscuro y 5% de fragmentos líticos de color rojizo. Matriz predominantemente tamaño ceniza gruesa con la misma composición.

Se muestreó, además, las lavas de los Domos Tinto y Sur, ubicados en el flanco suroeste del volcán en busca de enclaves máficos. Estos corresponden a domos de lavas andesíticas ricas en cristales con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y menor clinopiroxeno en una masa fundamental vítrea, con 5 ± 3 ka ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en masa fundamental), las cuales tienen abundantes enclaves máficos que muestran evidencias de mezcla con un magma máfico (Watts et al., 2014). En terreno se observó rocas con textura porfídica con un 80% de plagioclasa, 15% de anfíbol y 5% de biotita en una masa fundamental gris rosada, las que contienen enclaves máficos con textura microfanerítica que fueron analizados usando la técnica QEMSCAN. Las imágenes obtenidas indican que la composición de los enclaves corresponde a plagioclasa y cristales máficos como piroxeno y anfíbol predominantemente, cantidades subordinadas de cuarzo y mucha menor biotita. Se observó estos enclaves en ambos domos, siendo mucho más abundantes en el Domo Tinto.

Conocer los mecanismos de erupción de los eventos más recientes del volcán Guallatiri puede funcionar como una importante base para generar nuevos mapas de peligro y de riesgo de las comunidades aledañas al centro eruptivo a una escala más local, punto en el que aún puede realizarse bastante investigación ya que la mayoría de los estudios se ha concentrado en un punto de vista más regional.

Palabras Clave: Volcán Guallatiri, Zona Volcánica Central, Mecanismos eruptivos, Microscopía, Texturas de desequilibrio.

Financiamiento: Costos asociados serán financiados por Instituto Milenio de investigación en riesgo volcánico - Ckelar Volcanes (ICN2021_038).

Referencias:

- Jorquera, C., Rodríguez, I., Bertín, L., & Flores, F. (2019). Peligros Volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, 1, 35-45.
- Sepúlveda, J. P., Aguilera, F., Inostroza, M., & Reyes, M. P. (2021). Geological evolution of the Guallatiri volcano, Arica y Parinacota Region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103117.
- Watts, R. B., Ribes, J. C., & Sparks, R. S. J. (2014). The origin and emplacement of Domo Tinto, Guallatiri volcano, Northern Chile. *Andean Geology*, 41(3), 558-588.

Geoquímica isotópica de Sr-Nd-Pb-Hf del volcanismo intraplaca de las islas San Félix y San Ambrosio, Pacífico SE

Cristóbal Concha Yutronic¹, Javier Reyes¹, Sebastián Santana¹, Luis Lara²⁻³, Oliver Cooper⁴

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias

(3) CKELAR Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico

(4) Amphos 21 Consulting

Las islas San Félix y San Ambrosio corresponden a la expresión superficial de un complejo volcánico de intraplaca que se alza sobre la placa de Nazca en el Pacífico suroriental. La isla San Ambrosio, de ca. 2,9 Ma, comprende dos grupos composicionales principales: 1) Lavas y diques ricos en Mg, que representan la base de la isla e incluyen xenolitos cumulosos ultramáficos, y 2) Diques pobres en Mg, que alimentan la secuencia superior y se habrían formado como resultado del fraccionamiento de olivino y clinopiroxeno. Ambos grupos exhiben enriquecimiento en elementos incompatibles, especialmente en LILE, y muestran un patrón de elementos de HREE quebrado, lo que sugiere una fuente de manto enriquecido con respecto al MORB, con granate como fase residual. En tanto, la isla San Félix, de ca 0,4 Ma, está conformada por dos grupos principales: 1) un cono de tobas, que representa la transición del volcanismo submarino al insular, y 2) un *plateau* de lavas basaníticas que se formó en condiciones sub aéreas. Estas rocas son más alcalinas que las rocas de San Ambrosio y exhiben un patrón ligeramente más enriquecido de elementos traza y REE.

Mediante el análisis de nuevos datos isotópicos de Sr-Nd-Pb-Hf, se puede dar cuenta de que ambas islas muestran una isotopía enriquecida respecto al DM, con una distribución restringida en los distintos sistemas isotópicos. En particular, no se observan diferencias notables entre ambas islas para las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, pero sí se aprecian valores más enriquecidos de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para la isla San Ambrosio. Internamente no se visualizan variaciones importantes en San Ambrosio, mientras que en San Félix destacan los valores enriquecidos en la isotopía de Sr, Nd y Hf visibles en las coladas más jóvenes emitidas desde el cono de tobas respecto al *plateau*. Por otra parte, se observa un enriquecimiento relativo de las rocas de San Félix y San Ambrosio en comparación con las demás islas oceánicas de Nazca, especialmente apreciable en $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, lo que refleja las complejas heterogeneidades composicionales del manto bajo la placa de Nazca.

Palabras Clave: Volcanismo intraplaca, Isótopos, OIB, San Félix, San Ambrosio.

Condiciones pre-eruptivas de los productos volcánicos asociados a la Ignimbrita Enco, Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco

Claudia Contreras Gordillo¹, Eduardo Morgado Bravo¹

(1) Escuela de Geología, Universidad Mayor, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, 7500994, Chile

El Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMCH; 39°55'50"S, 72°01'41"O) se encuentra ubicado en la Región de los Ríos, Provincia de Valdivia, en la comuna de Panguipulli en Chile. El CVMCH se encuentra en la posición n°9 de un total de 92 sistemas volcánicos en ranking de riesgo específico según el impacto de procesos volcánicos (SERNAGEOMIN, 2023).

El CVMCH se encuentra en la cordillera principal en la Zona Volcánica Sur Central (ZVSC), la cual está limitada al oeste con el margen convergente entre la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana, entre los 27°S y los 40°S (Rodríguez et al., 2021). El complejo volcánico está constituido por una estructura compuesta, la cual se divide en el cono Mocho y el volcán Choshuenco. Estos centros emisores, a lo largo de los años, han presentado diversas erupciones, dejando productos eruptivos de gran variedad composicional (desde 55,5 hasta 66,7 SiO₂ % en peso). Un ejemplo de los productos explosivos emitidos durante el Holoceno corresponde a la Ignimbrita Enco, la cual corresponde a corrientes de densidad piroclástica (CDP) y depósitos de caída asociados a un evento Sub-Pliniano (Rawson et al. 2015), en donde a partir de radiocarbono (¹⁴C) determinaron que la edad de erupción es de hace 1.500 años (Rawson et al. 2015). La Ignimbrita Enco se compone principalmente por CDP, bombas y lapilli de composiciones andesíticas, en donde la mineralogía principal corresponde a fenocristales de olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno, plagioclasa, espinela, titanomagnetita e ilmenita.

El estudio de las condiciones pre-eruptivas de los productos de la Ignimbrita Enco permite entender el potencial comportamiento del reservorio magmático y el posible escenario futuro de una ignimbrita de composición andesítica. Para el estudio, usamos química mineral en once muestras para obtener las condiciones pre-eruptivas en que se encuentra el reservorio asociado la Ignimbrita Enco: temperaturas de hasta ~1080°C, fugacidad de oxígeno de ~ΔNNO 1 y presiones de 2,06 kbar (equivalente a 5 km de profundidad).

Palabras Clave: Zona Volcánica Sur, Geotermobarometría, Fugacidad de oxígeno.

Financiamiento: FONDECYT Iniciación (N° 11230197).

Referencias:

- Rawson H., Naranjo J., Smith V., Fontijn K., Pyle D., Mather T. y Moreno H., (2015). The frequency and magnitude of post-glacial explosive eruptions at Volcán Mocho-Choshuenco, southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Volume 299. Pages 103-129.
- Rodríguez C., Scheck M., Gomez M., Bott J., Prezzi C. y Strecker M., (2021). Lithospheric density structure of the southern Central Andes constrained by 3D data-integrative gravity modelling. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 110, 2333–2359.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), (2023). Ranking de los volcanes según impacto de procesos volcánicos.

The Mate Grande Volcano, a recently discovered major stratovolcano in the Southern Volcanic Zone's Slab Window Region of Chilean Patagonia

Gregory Paul De Pascale¹, Francisco Gutiérrez³, Daniel Moncada², Mario Persico², Sergio Sepúlveda⁴

(1) University of Iceland, Institute of Earth Science, 102, Reykjavik, Iceland

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) GeoExpedition, Las Barrancas 25, Pirque, Chile

(4) Simon Fraser University, Earth Sciences, Vancouver, Canada

The Southern Volcanic Zone (SVZ) south of ~41.5° S is structurally controlled at the near surface by the master trace of the Liquiñe-Ofqui Fault Zone (LOFZ) with all minor monogenetic cones (e.g. spatter/cinder cones) and stratovolcanoes found along the master trace of the LOFZ or west of this until Volcan Hudson in the South. Research neotectonic and structural geology investigations allowed the discovery of the Mate Grande Volcano (or Volcan Mate Grande - VMG, found west of Coyhaique and Northwest of the Hudson Volcano) which is found along the master LOFZ and is also offset along this fault (De Pascale et al., 2021). This stratovolcano is found to the east of the minor (and previously known) monogenetic cone field known as the Grupo Aysen, south of the Aysen Fjord, and northwest of the Hudson Volcano. It has a distinct geochemistry of the nearest neighbours (volcanoes Maca, Cay, and Hudson), and is likely near the surface projection of the slab window (De Pascale et al., 2021). We present the geologic mapping of the Mate Grande Volcano, the geomorphology of the volcano including glacial history, new geochemical data, and the structural connection with the LOFZ and compare this with the adjacent volcanic systems. Volcan Mate Grande is 1,280 m high and thus Vesuvius-sized and grew in a caldera also offset along the LOFZ and is non-glaciated. New unpublished geochemical data and modelling is shown here as well that further demonstrates the variability of VMG with neighbors in the SVZ. Because this area was covered in ice until approximately 12,000 years before present, this means the Mate Grande Volcano is active and is thus an important source of regional volcanic hazards and should be monitored like the nearby major volcanoes like Volcan Hudson. Although there is only limited infrastructure in the region, and much remains to be discovered regarding the VMG, this is certainly a source of major eruptions and should be better characterised and considered to be included in the regional monitoring. The Mate Grande Volcano is upwind of some of the major population centers so poses an important risk for ash fallout from eruptions for the regional center of Coyhaique and smaller towns such as Cochran and Puerto Rio Tranquilo and towns in Argentine Patagonia. Ongoing new mapping and geochemical data will be presented from this work as well that provides new insight into the SVZ and volcanism and the neotectonics near Chile's slab window region in Patagonia.

Keywords: Southern Volcanic Zone, Volcan Mate Grande, Chilean Patagonia, Volcanic Hazards, Slab Window.

Financing: Fondecyt 11160038CIMAR24 (CONA/SHOA). University of Iceland's Research Fund and Start up Fund from the Earth Science Institute.

References:

- De Pascale, G.P., Froude, M., Penna, I. et al. Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Sci Rep* 11, 7069 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86413-w>.

Sobre el origen de los magmas adakíticos de la Zona Volcánica Austral: condiciones redox de la fusión parcial, profundidad e hibridación mantélica

José Joaquín Figueroa Ruiz¹, Alexandre Corgne²

(1) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Edificio Emilio Pugín, Avenida Eduardo Morales Miranda, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

Las adakitas son rocas magmáticas que ocurren en márgenes convergentes. Se definen químicamente por sus altos contenidos en SiO_2 (>56 wt%) y Al_2O_3 (≥ 15 wt%), bajos contenidos en HFSE (como en lavas de arco), Y y HREE, altas razones Sr/Y y La/Yb. Varios modelos petrogenéticos explican estas características específicas (e.g. Castillo 2006): (i) fusión parcial de *slab* joven y aún caliente, la cual es seguida por una probable hibridación con fundidos de la cuña del manto; (ii) fusión parcial de la cuña del manto metasomatizada por fundidos de *slab*; (iii) fusión parcial de corteza continental inferior engrosada y potencialmente afectada por delaminación; (iv) diferenciación de magmas basálticos a alta presión. Las distintas fuentes de magmas adakíticos involucran litologías máficas, generalmente de alta presión, para poder estabilizar granate y/o anfíbol y así producir las características químicas mencionadas anteriormente. El magmatismo de la Zona Volcánica Austral (AVZ) ha sido tradicionalmente vinculado al primer modelo petrogenético de fusión de *slab* porque implica la subducción de la placa joven Antártica (< 20 Ma). El estudio de muestras de la AVZ ofrece la posibilidad de entender mejor las condiciones petrogenéticas asociada al modelo de la fusión de *slab*. En particular, podría permitir tener más claridad sobre la amplitud del proceso de hibridación con materiales mantélicos. Otra importante incertidumbre se relaciona al estado redox de las fuentes de magmas de arco, que sean generados por fusión de *slab* y/o de la cuña mantélica. La visión generalmente predominante es que las zonas de subducción son oxidadas debido a la liberación de fluidos oxidantes desde el *slab* y, por lo tanto, los magmas de arcos nacen oxidados (e.g. Kelley y Cottrell 2009). Sin embargo, otros argumentos ponen en duda esta interpretación y consideran más bien que las fuentes son relativamente reducidas y que los magmas se oxidan durante su ascenso a niveles corticales (Lee et al. 2005). Esta alternativa es respaldada por el descubrimiento reciente que sostiene que la descomposición de la antigorita libera fluidos reductores y no oxidantes como las reacciones de descomposición de la brucita y clorita (Piccoli et al. 2019). Para aportar a la discusión sobre el estado redox de las zonas de subducción, en particular en zonas donde existe magmatismo adakítico, este trabajo se ha enfocado en compilar datos químicos (desde las bases de datos GEOROC y PETDB) de las adakitas interpretadas como productos de fusión de *slabs*, incluyendo las adakitas de la AVZ. En particular se compararon razones de V/Sc para estimar, de forma indirecta, la fugacidad de oxígeno de las fuentes magmáticas (e.g. Lee et al. 2005; Wang et al. 2019). V^{3+} y Sc, al ser trivalentes y de tamaños parecidos, tienen un comportamiento geoquímico similar. Sin embargo, a medida que aumenta la fugacidad de oxígeno, V cambia progresivamente su valencia a V^{4+} y luego V^{5+} , incrementando también su incompatibilidad. Por lo tanto, la variación de V/Sc debería reflejar un cambio de valencia del V y, por consiguiente, diferente condición redox.

Los resultados preliminares de este trabajo muestran que, a contenidos equivalentes de MgO (2-5 wt%), se presentan menores razones de V/Sc para la AVZ en comparación con los demás arcos estudiados (Zona Volcánica Norte de los Andes, Tonga, Honshu, Kamchatka, Cinturón Mexicano, Luzon, Centro América, entre otros), sugiriendo que el magmatismo ocurre bajo condiciones más reducidas. Se observa dentro de la AVZ que las adakitas del volcán Cook son las menos evolucionadas debido a su mayor Mg#, Ni, MgO y menor SiO_2 en comparación con los otros centros eruptivos. Además, en los diagramas de V/Sc vs Ni y V/Sc vs SiO_2 se aprecia un claro aumento de SiO_2 y disminución de Ni de sur a norte (desde Cook a Lautaro). A partir de lo anterior, es posible que los magmas del volcán Cook experimentaron mayor hibridación con fundidos provenientes del manto debido a su alta concentración de Ni. Incluso, esta concentración de Ni también es relativamente mayor en comparación a la mayoría de adakitas derivadas por fusión del *slab* generadas en los arcos de Europa, Centro América y Oceanía (típicamente Ni<30 ppm). Esto es coherente con una zona de fusión parcial más profunda para Cook debido a que en esta zona la placa oceánica ingresando en subducción es más vieja (~21 Ma) y fría que más al norte (<12 Ma) (Cande y Leslie, 1986). En este caso, los fundidos del *slab* deben recorrer un camino más largo, lo que podría generar una mayor interacción química con la cuña del manto. Por otra parte, se evidencia un aumento de Sr/Y de norte a sur dentro de la AVZ, lo que respalda la hipótesis de una fusión a menor profundidad hacia el norte, afuera del campo de estabilidad del granate.

Palabras Clave: Adakitas, Fugacidad de oxígeno, Zona Volcánica Austral, Fusión de *slab*, Hibridación.

Financiamiento: Fondecyt Regular 1220502 "Vanadium partitioning between metabasalt minerals and hydrous melts during partial melting of subducted oceanic crust".

Referencias:

- Cande, S. C., Leslie, R. B. 1986. Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B1), 471-496.
- Castillo, P. R. 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese science bulletin*, 51, 257-268.
- Kelley, K. A., Cottrell, E. 2009. Water and the oxidation state of subduction zone magmas. *Science*, 325(5940), 605-607.
- Lee, C. T., Leeman, W. P., Canil, D., Li, Z. X. A. 2005. Similar V/Sc systematics in MORB and arc basalts: implications for the oxygen fugacities of their mantle source regions. *Journal of Petrology*, 46(11), 2313-2336.
- Piccoli, F., Hermann, J., Pettke, T., Connolly, J. A. D., Kempf, E. D., Vieira Duarte, J. F. 2019. Subducting serpentinites release reduced, not oxidized, aqueous fluids. *Scientific Reports*, 9(1), 19573.
- Wang, J., Xiong, X., Takahashi, E., Zhang, L., Li, L., Liu, X. 2019. Oxidation state of arc mantle revealed by partitioning of V, Sc, and Ti between mantle minerals and basaltic melts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), 4617-4638.

Petrological study of lava flows from Barranco Colorado volcano, South Southern Volcanic Zone, Chile

José Joaquín Figueroa Ruiz¹, Alexandre Corgne², Verena Häussermann³

(1) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Edificio Emilio Pugín, Avenida Eduardo Morales Miranda, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(3) Universidad San Sebastián, Escuela de Ingeniería en Gestión de Expediciones y Ecoturismo, Facultad de Ciencias de la Naturaleza, Lago Panguipulli 1390, Puerto Montt, Chile

The studied samples were collected from several lava flows of the Barranco Colorado volcano, a small (1060 m above sea level) and little-known stratovolcano located in the densely vegetated Ayacara Peninsula on the west bank of Comau Fjord (42°23'S - 72°30'W), where the trace of the Liquiñe-Ofqui fault zone has been inferred (Cembrano et al. 1996). Whole-rock major and trace element contents indicate that the erupted products range from basaltic andesites to dacite with calc-alkaline affinity and trace element patterns typical of arc magmas (LILE/HFSE decoupling). Collected samples can be assigned to 8 lava flows based on location and geomorphological constraints, which correspond to 7 distinctive eruptive events considering their petrographic and geochemical fingerprints. Ar-Ar dating of two of the least evolved samples provided a zero age within uncertainties, thus indicating that Barranco Colorado edifice probably formed during the Holocene, which is also supported by the lack of geomorphological evidence for glacial erosion of its flanks. Petrogenetic modeling of each eruptive event is currently underway using constraints from major, trace and isotope whole-rock composition and mineral chemistry. Preliminary results indicate a relatively shallow mantle source in the stability field of spinel (about 60 km depth, Robinson & Wood, 1998), which is relatively enriched in incompatible trace elements compared to primitive upper mantle (PUM) values (McDonough & Sun, 1995). The REE patterns can be reproduced considering a mantle source with enrichment equivalent to a 40-60% PUM-SCLM (subcontinental lithospheric mantle) mixture. The generation of a subset of lavas is better explained by 12% degree of melting of this mantle source, while the remaining lavas require about 20% degree of melting of the same source. Such source characteristics are similar to the ones considered for nearby Hornopirén and Hualailhué volcanoes, but are markedly different from those inferred for Llaima, Villarrica and Osorno volcanoes, thereby pinpointing to distinct mantle sources for South and Central SVZ volcanoes. There is also petrographic (xenocrysts) and geochemical (LREE enrichment) evidence for assimilation of crustal material during magma ascent. We are currently measuring Sr-Nd isotope ratios to constrain further source characteristics and crustal assimilation. Study of the conditions of magma storage and pre-eruptive dynamics from phenocryst disequilibrium textures and geothermobarometry is also in progress. Preliminary data using olivine-chromite (Coogan et al. 2014), and cpx-liquid (Putirka et al. 2003) thermometers and plagioclase-liquid thermobarometer (Putirka, 2008) indicate a potential storage at 1100-1200 °C and 4.5±1.5 kbar (18±6 km deep). With respect to volcanic hazards, Barranco Colorado can be considered an active volcano, given its likely recent eruptive history. The range of relatively evolved magma compositions should produce strombolian-vulcanian eruption (VEI=2-4). The proximity with Comau fjord could lead to phreatomagmatic activity, which could potentially produce edifice collapse and tsunamis in the fjord.

Keywords: Geochemistry, Petrogenesis, Barranco Colorado, South Southern Volcanic Zone.

Financing: Este estudio fue financiado por el proyecto FONDECYT 1161699, cuya investigadora responsable es la Dra. Verena Häussermann.

References:

- Cembrano, J., Hervé, F., Lavenue, A. 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1-3), 55-66.
- Coogan, L. A., Saunders, A. D., Wilson, R. N. 2014. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. *Chemical Geology*, 368, 1-10.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- Putirka, K. D., Mikaelian, H., Ryerson, F., Shaw, H. 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist*, 88(10), 1542-1554.
- Putirka, K. D. 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 69(1), 61-120.
- Robinson, J. A. C., Wood, B. J., 1998. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1-2), 277-284.

Pre-eruptive conditions at Toconce Volcano (northern Chile): Evidence for a two-body magma plumbing system

Luis Flores Gutiérrez¹, Benigno E. Godoy Neira², Dale H. Burns³, Osvaldo González-Maurel⁴, Inés Rodríguez⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad San Sebastián, Bellavista 7 Recoleta, Santiago, Chile

(3) Stanford University, Department of Geological Sciences, Stanford, United States

(4) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Concepción, Chile

(5) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Temuco, Chile

The NW-SE trending San Pedro-Linzor volcanic chain (SPLVC) is constructed directly above a regional geophysical anomaly that have been interpreted as a large upper crustal magma body (Altiplano-Puna Magma Body; APMB) beneath the Central Andes of northern Chile. Many petrological studies have constrained the nature of the eruptions in the SPLVC [1, 2]; however, the storage history of the parental magmas remains under-studied. In order to locate the depth(s) of the magma supply for these volcanic eruptions, we estimated the pre-eruptive conditions from one of the best-preserved Pleistocene stratovolcanoes in the SPLVC, the Toconce volcano [1].

In this study, we utilize two-pyroxene and clinopyroxene-melt thermobarometry to understand the P-T-t pathways of pyroxene-rich dacitic lavas of four different units from Toconce volcano, which were erupted in the last 1 Myr [1]. These units are, from oldest to youngest: Rio Linzor, Turi, Puna-Seguel, and Toconce. As the pyroxenes of these units are typically compositionally zoned, we estimate the P-T conditions and storage depths of both cores and rims. Our results suggest that the plumbing system in Toconce volcano is formed by at least two magmatic chambers: i) a deeper reservoir (15.5-18 km depth) with pressures of 430 to 500 MPa and temperatures ranging between 975 to 990°C, and ii) a shallower chamber (6-11 km depth) with pressures ranging from 170 to 310 MPa and temperatures from 1,020 to 1,040°C.

Pyroxene thermobarometry results from core and rims of these units indicate that the early erupted units (Rio Linzor cores and rims and Turi cores) crystallized in the deeper reservoir. In contrast, Turi rims and pyroxene from Puna-Seguel (cores and rims) yield pressures and temperatures consistent with crystallization in the shallower chamber. This indicates a temporal shift from deeper to shallow storage during the evolution of the Toconce system. Finally, pyroxene thermobarometry from the youngest unit (Toconce) suggests a shift back to crystallization within the deeper reservoir. We propose that these temporal variations could be in part related with multiple mafic recharge events during which new batches of parental magma were delivered into the APMB; reheating and modifying the magma properties (e.g., composition, temperature, density) of the melts residing within the reservoirs.

Keywords: Thermobarometry, Toconce, Magma mixing, Magmatic reservoirs.

Financing: This work has been funded by Proyecto Fondecyt Iniciación 11200013 "Boron and Oxygen isotopes systematics constraining slab-derived fluids contribution to arc-magmatism at the Altiplano-Puna Volcanic Complex (Central Andes, northern Chile)".

References:

- [1] Godoy et al. (2017). Sr- and Nd- isotope variations along the Pleistocene San Pedro-Linzor volcanic chain, N. Chile: Tracking the influence of the upper crustal Altiplano-Puna Magma Body. *JVGR* 341, 172-186.
- [2] González-Maurel et al. (2019). The great escape: Petrogenesis of low-silica volcanism of Pliocene to Quaternary age associated with the Altiplano-Puna Volcanic Complex of northern Chile (21°10'-22°50'S). *Lithos* 346-347, 105162.

Emplacement dynamics of lava flows at Lonquimay and Llaima volcanoes using UAVs and petrographic analysis

Luis Flores Gutiérrez¹, Ángelo Castruccio¹, Luna Pérez²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile

In this study, we analyzed the emplacement dynamics of three lava flows emitted during historical eruptions of the XX century on two of the most active volcanoes of the Southern Volcanic Zone of Chile: Lonquimay and Llaima. The 1988-90 Lonquimay eruption generated a cinder cone (Navidad) on the northeast flank of the volcano, from which an andesitic (59% SiO₂) lava flow was emitted [1,2]. The 1957 Llaima eruption was a two-year cycle, the effusive phase was characterized by two lava flows of basaltic andesite composition (52-53% SiO₂), emitted from the north and east flanks of the volcano [3].

We built high-resolution Digital Elevation Models (DEMs) for the lava flows by 2D photogrammetry, using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) together with petrographic analysis to estimate the rheology and eruptive parameters of lava flows. The Lonquimay lava flow has a volume of 2×10^8 m³ and was emitted in 13 months. It has a length of 10 km with a mean thickness of 30 m. The 1957 Llaima eruption produced two lava flows, with volumes of 7×10^7 and 3×10^7 m³ respectively. Both flows were emitted in a lapse of 4 days. The lengths are 13 and 8 km from the vent, with a mean thickness of 10 m.

Lonquimay unit is a simple lava flow, with an increase in thickness, from 10 m at the vent to 60 m at the front. It has ogives (flow ridges) that increase in abundance and height towards the front. The Llaima units are compound lava flows with multiple flow units, especially close to the vent. They have a thickness that does not increase systematically with distance. Ogives are more abundant closer to the vent. These differences suggest a cooling-limited control for the Lonquimay flow and a volume-limited control for the Llaima flows.

The measurements of ogive dimensions allowed us to estimate rheological parameters such as the yield strength. Our results show that compound lava flows are not always produced by long-lived, low effusion rate eruptions, but depend also on the lava rheology and topography.

Keywords: Lava flow, UAVs, Physical volcanology

Financing: This work has been funded by the Proyecto Fondecyt Regular 1211869 "The role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes".

References:

- [1] Moreno, H., Gardeweg, M., 1989. La erupción reciente en el complejo volcánico Lonquimay (Diciembre 1988-) Andes del Sur. Rev. Geol. Chile 16, 93–117.
- [2] Naranjo, J.A., Sparks, R.S.J., Stasiuk, M.V., Moreno, H., Ablay, G.J., 1992. Morphological, structural and textural variations in the 1988–1990 andesite lava of Lonquimay Volcano. Chile. Geol. Mag. 129, 657–678.
- [3] Naranjo, J.A., Moreno, H., 2005. Geología del volcán Llaima, Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 88, 33 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

Origen de flujos de lava andesíticos en el Complejo Volcánico Laguna del Maule, Chile

Nataly Freire¹, Benigno E. Godoy Neira², Claudio Contreras³⁻⁴

- (1) Universidad Central de Chile, Carrera de Geología, Escuela de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Lord Cochrane 418, Santiago (Santiago), Chile
 (2) Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Bellavista 7, Santiago (Recoleta), Chile
 (3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 6111, Rancagua, Chile
 (4) University of Bristol, School of Earth Sciences, Faculty of Science, Queens Road, BS8 1RJ, Bristol, United Kingdom

El Complejo Volcánico Laguna del Maule se encuentra ubicado en la Región del Maule, en la comuna de San Clemente (36°03'18"S 70°30'00"W), formando parte de la Zona Volcánica Sur Transicional, abarcando un área de 500 km². Este complejo volcánico comprende composiciones magmáticas que van desde basálticas (51% en peso de SiO₂) hasta riolíticas (77,6% en peso de SiO₂), donde se destacan unidades pre – glaciales (Pleistoceno) que contemplan 115 conos, domos y flujos de lava monogenéticos; y unidades post – glaciales que comprende 24 centros de emisión (Hildreth et al., 2010).

El Complejo Volcánico Laguna del Maule ha sido foco de varios estudios, esto es debido a que se encuentra inmerso en un periodo de agitación que ha durado más de una década. Resultados de estos estudios han determinado que el origen de las riolitas presentes en este complejo volcánico estaría asociado a un reservorio magmático de tipo *mush*, rico en cristales (>50% vol.) (Andersen et al., 2017; 2018). Pese a esto, aún queda en incógnita la formación de otros magmas erupcionados en el Complejo Volcánico Laguna del Maule y el rol que cumplen en la formación y erupción de los magmas riolíticos presentes en este complejo volcánico.

Hildreth (2010), destaca al menos 15 unidades andesíticas, ubicadas en la zona oeste de la Laguna del Maule, formando desde conos de escoria hasta flujos de lava, pudiendo presentar mineralogías variables que van desde olivinos hasta cuarzos, donde los cristales presentan fases minerales con textura de desequilibrio (Andersen et al., 2017; 2018; Cáceres et al., 2018).

Las rocas erupcionadas en el Complejo Volcánico Laguna del Maule tienen, además, composiciones químicas que van desde calcoalcalina a calcoalcalina con alto K (Andersen et al., 2017; Hildreth et al., 2010). Así, se ha propuesto que los basaltos parentales presentes en este complejo volcánico no habrían producido andesitas solamente mediante cristalización fraccionada (Andersen et al., 2018; Cáceres et al., 2018; Contreras et al., 2022).

Existen estudios previos donde se han establecido las condiciones de génesis de los magmas basálticos y riolíticos que han sido erupcionados durante la historia evolutiva del Complejo Volcánico Laguna del Maule, entre las cuales se encuentran las presiones, temperaturas y las profundidades de los magmas durante su ascenso hacia la superficie (Andersen et al., 2017; Hildreth 2010). La interacción entre un magma máfico y silíceo en las lavas presentes en este complejo volcánico queda en evidencia debido a las texturas a escala de afloramiento mineral de lavas riolíticas (Andersen et al., 2018). Tomando en cuenta que las andesitas no pueden ser generadas meramente por cristalización fraccionada (Contreras et al., 2022), se plantea que los flujos andesíticos presentes en el Complejo Volcánico Laguna del Maule han sido generados debido a algún proceso de contaminación magmática, en el cual magmas basálticos y riolíticos que han generado los productos de este complejo volcánico han interactuado, dando como producto final aquellos flujos de composición intermedia.

Para la realización de este proyecto, se llevó a cabo una campaña en terreno, donde se visitaron los flujos de la zona oeste de la Laguna del Maule, obteniéndose muestras de las siguientes unidades, según mapa de Hildreth (2010): Andesita de Laguna Sin Puerto (asp), Andesita de Península Joven (apj), Andesita de Arroyo Los Mellicos (aam) y Andesita de Península Vieja (apv).

De esta manera, este trabajo tiene como hipótesis que el origen de los flujos andesíticos provienen del proceso de mezcla magmática. Para lograr esto, se desarrollarán métodos geoquímicos, considerando los análisis de investigaciones previas (Hildreth et al., 2010), entre los que se contemplan análisis de isótopos radiogénicos, elementos traza, tierras raras y óxidos mayores, para posteriormente procesar y analizar los datos, generando modelos que permitan explicar la génesis de estos magmas andesíticos.

Se espera llevar a cabo el proyecto exitosamente, determinando que el origen de los flujos andesíticos proviene del proceso de mezcla de magmas, dado los registros de una interacción de magmas basáltico y riolíticos, dando como producto final magma de composición intermedia que generó estos flujos (Andersen et al., 2018).

Palabras Clave: Laguna del Maule, Complejo volcánico, Lavas andesíticas, Mezcla de magmas, Volcanología.

Financiamiento: FONDECYT Iniciación 11200013 a B.G.

Referencias:

- Andersen, N.L., Singer, B.S., Jicha, B.R., Beard, B.L., Johnson, C.M., Licciardi, J.M. 2017. Pleistocene to Holocene growth of a large upper crustal rhyolitic magma reservoir beneath the active Laguna del Maule volcanic field, central Chile. *J. Petrol.* 58:85–114. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx006>.
- Andersen, N.L., Singer, B.S., Costa, F., Fournelle, J., Herrin, J.S., Fabbro, G.N. 2018. Petrochronologic perspective on rhyolite volcano unrest at Laguna del Maule, Chile. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.043>.
- Contreras, C., Cashman, K.V., Rust, A., Cortés, M. (2022). The Influence of Magma Storage and Ascent Conditions on Laguna del Maule Rhyolite Eruptions. *J. Petrol.*, 63(12):egac121, <https://doi.org/10.1093/petrology/egac121>.
- Cáceres, F., Castruccio, A., & Parada, M. A. (2018). Morphology, effusion rates, and petrology of postglacial lavas of Laguna del Maule volcanic field, Chilean Andes, and implications for their plumbing system. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(12):4925–4944.
- Cáceres Acevedo, F. A. (2016). Magma storage conditions and eruptive dynamics of post-glacial effusive volcanism at Laguna del Maule Volcanic field.
- Hildreth W., Godoy E., Fierstein J., Singer B. 2010. Laguna del Maule Volcanic Field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean rangecrest in central Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N°63*.

New fluid inclusions frontiers for volcanic eruptions

Esteban Gazel Dondi¹, Kyle Dayton¹, Charlotte DeVitre¹⁻², Penny Weiser², Héctor Lamadrid³

(1) Cornell University, Earth and Atmospheric Sciences, Ithaca, NY, USA

(2) University of California Berkeley, Department of Earth and Planetary Sciences, Berkeley, California, USA

(3) University of Missouri, Department of Geological Sciences, Columbia, Missouri, USA

One of the most important challenges in modern volcanology studies is constraining the depth of magmatic reservoirs that supply and sustain eruptions. Although fluid inclusions (FI) are a standard tool to investigate the physicochemical record of ore deposits, this powerful technique is rarely applied to elucidate volcanic processes. This is partly related to the optical limitations of microthermometry using heating-cooling stages (e.g., Goldstein and Reynolds, 1994). This technique is also time-consuming and requires a highly trained user. Of particular interest for volcanic eruptions are CO₂-rich FI, as their densities can be accurately translated into pressure by an equation of state (Dayton et al, 2023). Over the last few years, our efforts focused on providing a new, high-precision Raman spectroscopy FI barometer. We started by constructing a new Raman CO₂ densimeter using an external calibration built with a high-precision optical cell and Ne as an internal standard (DeVitre et al., 2021). We also evaluated the laser effects on CO₂ heating, solved challenges related to presence of multiphase carbon (carbonate, supercritical, liquid+vapor) by re-heating experiments, and produced scripts for efficient data reduction (DeVitre et al., 2023). With these new methodologies available to the community, we can now apply the Raman CO₂ barometer to FI samples that are an order of magnitude smaller (down to ~1 μ m) and faster (a few days) than possible with microthermometry. The 2021 La Palma eruption provided an unprecedented opportunity to test the relationship between earthquakes and potential magma reservoirs. We performed density measurements from CO₂-rich fluid inclusions (FI) hosted in olivine crystals that are highly sensitive to pressure via calibrated Raman spectroscopy from erupted tephra. This technique can revolutionize our knowledge of magma storage and transport during an ongoing eruption in near real-time, given how fast (a few days) it can produce precise magma storage depth constraints from minimal sample preparation. Our FI have CO₂ recorded densities from 0.73-0.98 g/cm³, translating into depths of 15 to 27 km, which falls within the reported deep seismic zone recording the main melt storage reservoir (Dayton et al, 2023). The depths were also confirmed by recent melt inclusion measurements from our lab. These new data in the context of global explosive intraplate mafic eruptions suggest that these eruptions are sustained from the mantle by high volatile concentrations inherited from their source.

Keywords: fluid inclusions, mafic explosive volcanism, La Palma 2021 eruption, melt barometry.

Financing: This work was supported by NSF No. EAR 2216738 and NAS No. 80NSSC20K1674.

References:

- Dayton, K., Gazel, E., Wieser, P., Troll, V. R., Carracedo, J. C., LaMadrid, H., Ward, J., Aulinas Junca, M., Geiger, H., Deegan, F., M., Gisbert Pinto, G., Pérez-Torrado, F. J., 2023. Deep magma storage during the 2021 La Palma eruption. *Science Advances* 9, eade7641.
- DeVitre, C., Allison, C., Gazel, E. 2021. A high-precision CO₂ densimeter for Raman spectroscopy using a Fluid Density Calibration Apparatus. *Chemical Geology*, 584, 120522.
- DeVitre, Gazel, E., Dayton K., Pamuku, A., Gaetani, G. A., 2023. The effect of laser heating on Raman spectroscopy measurements of liquid-vapor bearing CO₂ rich melt inclusions – in press *Volcanica*.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. *Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals Society for Sedimentary Geology*, 199.

Reciclaje de anfíbol en domos riolíticos del Complejo Volcánico Altiplano-Puna: Estudio geoquímico en inclusiones vítreas del Cerro La Torta y Chac-Inca

Loreto Tamara Hernández Prat¹, Benigno E. Godoy Neira², Daniel Astudillo Manosalva³, Claudia Cannatelli⁴, Ángel Castruccio¹, Stephen M. Elardo³

(1) Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad San Sebastián, Bellavista 7, Recoleta (Santiago), Chile

(3) Department of Geological Sciences, University of Florida, 241 Williamson Hall, Gainesville, FL 32611, USA

(4) Department of Geological Sciences, University of Alaska Anchorage, Anchorage, AK 99508, USA

El Complejo Volcánico Altiplano-Puna (APVC por sus siglas en inglés), en el norte de Chile, es uno de los lugares con más actividad volcánica altamente silícica del mundo, erupcionando ca. 13.500 km³ de ignimbritas, lavas y domos volcánicos desde 11 Ma [1]. Todo esto ha ocurrido en ciclos con alternancia de alta actividad (con erupción de ignimbritas y formación de calderas, denominados estados de *flare-up's*) y baja actividad (con erupción de lavas y domos volcánicos, denominados estados de *steady-stage*) [1,2]. En la última etapa de baja actividad han surgido distintos domos volcánicos riolíticos (~68-72 % wt. SiO₂; [4,5]) conocidos como Tortas, debido a su forma redondeada y cima truncada, como son Cerro Chao, Chac-Inca, Chanka, Cerro Pabellón, Cerro La Torta, Domo D y Chillahuita, entre otros, todos menores a 1 Ma [3]. En general, estos domos corresponden a lavas de composiciones riolíticas con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, cuarzo y, menor medida, piroxeno, y entre 50 y 60 % vol. de una masa fundamental vítreas. Su origen y evolución ha sido poco estudiado, limitándose solo a petrología basada en composición de roca total y enclaves (cuando existen), siendo testigos del comportamiento del APVC en el último millón de años junto con la actividad geotermal en superficie [4,5].

En esta oportunidad se realizaron análisis geoquímicos de elementos mayores y trazas mediante microsonda electrónica (EMP), espectrometría de masas mediante ablación láser (LA-ICP-MS) y termobarometría en inclusiones vítreas y fases minerales de los domos La Torta y Chac-Inca. Los resultados indican un nuevo proceso de evolución de los magmas que formaron estos domos, un paso más allá de la cristalización presente: Reciclaje de anfíboles.

Se propone que la fuente del magma que generó estos domos corresponde a un *mush* magmático, con cristales de plagioclasa, anfíbol y menor piroxeno. Así, la evolución a partir de este magma se da por cristalización de plagioclasa (y óxidos Fe-Ti), por un lado, y de anfíbol, por el otro, hasta lograr el magma final que formó estos domos. De esta manera, el anfíbol, fase hidratada muy sensible al contenido de agua y temperatura del sistema en que cristaliza, presenta un desequilibrio generado por inyección(es) de magma(s) menos diferenciados, y de mayores temperaturas [e.g., 5]. Esto causa la disolución parcial a completa de esta fase mineral en el *mush*, pasando a ser parte del fundido residual, enriqueciendo el magma resultante en tierras raras pesadas (e.g., Gd, Dy, Yb) HREE y de alto campo iónico (e.g., Nd, Sm, Y) HFSE. La cristalización de nuevo anfíbol, a partir del fundido enriquecido, incorpora estos elementos generando nuevos cristales de anfíbol atrapando inclusiones vítreas con altas concentraciones de HREE y HFSE en sus centros, además de plagioclasa y biotita, hasta compartir la signatura geoquímica de su masa fundamental. Al mismo tiempo, la plagioclasa y cuarzo fueron arrastrados desde el *mush* original, siguiendo un camino de cristalización continuo hasta la formación final del magma que formó los domos La Torta y Chac-Inca, el cual se emplazó en niveles someros de la corteza, ~3.9 km, usando una densidad de la corteza continental de 2,7 kg/m³ [6].

Palabras Clave: Reciclaje de anfíbol, Cerro La Torta, Cerro Chac-Inca, Inclusiones vítreas, Magmatismo riolítico.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por la Beca de Doctorado Nacional ANID 20190-21190166 de Loreto Hernández, el Proyecto FONDECYT de Iniciación N°11200013 de Benigno Godoy, fondos UAA Start-Up Grant (N. 12267-104110) de Claudia Cannatelli y por fondos de la University of Florida en nombre de Stephen M. Elardo.

Referencias:

- [1] Salisbury, M. J., Jicha, B. R., de Silva, S. L., Singer, B. S., Jiménez, N. C., Ort, M. H. (2011). 40Ar/39Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province. *Bulletin*, 123(5-6), 821-840.
- [2] Kern, J. M., de Silva, S. L., Schmitt, A. K., Kaiser, J. F., Iriarte, A. R., Economos, R. (2016). Geochronological imaging of an episodically constructed subvolcanic batholith: U-Pb in zircon chronochemistry of the Altiplano-Puna Volcanic Complex of the Central Andes. *Geosphere*, 12(4), 1054-1077.
- [3] Tierney, C. R., Schmitt, A. K., Lovera, O. M., de Silva, S. L. (2016). Voluminous plutonism during volcanic quiescence revealed by thermochemical modeling of zircon. *Geology*, 44(8), 683-686.
- [4] De Silva, S. L., Self, S., Francis, P. W., Drake, R. E., Carlos, R. R. (1994). Effusive silicic volcanism in the Central Andes: The Chao dacite and other young lavas of the Altiplano-Puna Volcanic Complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B9), 17805-17825.
- [5] Taussi, M., Godoy, B., Piscaglia, F., Morata, D., Agostini, S., Le Roux, P., Hernández-Prat, L., Renzulli, A. (2019). The upper crustal magma plumbing system of the Pleistocene Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex area (Altiplano-Puna, northern Chile) as inferred from the erupted lavas and their enclaves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 373, 179-198.
- [6] Lucassen, F., Becchio, R., Harmon, R., Kasemann, S., Franz, G., Trumbull, R., Wilke, H., Romer, R. L., Dulski, P. 4), 195-223.

La historia de una lava desde su reservorio somero zonado hasta la superficie: El caso del volcán Azufre en el contexto del Altiplano Puna Magma Body (Norte de Chile)

Darío Hübner¹⁻², Miguel-Ángel Parada¹⁻², Eduardo Morgado²⁻³, Francisca Mallea-Lillo¹⁻²⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Chile

(4) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide, Australia

El volcán Azufre (21°47'S; 68°14'W) se encuentra emplazado sobre un lineamiento volcánico NO-SE de 70 km de largo por sobre el borde occidental del Altiplano Puna Magma Body, el cual es el mayor cuerpo magmático activo de la Tierra (~500.000 km³ de volumen; Ward et al. 2014). El depósito de lava más joven del volcán Azufre fue seleccionado para un estudio detallado debido a la importante información petrológica que se podría obtener al entender las condiciones de su reservorio como una potencial fuente de calor del sistema geotermal de Cerro Pabellón que se encuentra a menos 5km hacia el SE. El depósito corresponde a una lava tipo bloque de composición andesita-dacita (61 – 63 SiO₂ wt%) que pertenece a las unidades más jóvenes (<331 ka) de esta parte de los Andes Centrales. Su mineralogía comprende fenocristales de plagioclasa, anfíbol (Grupo 1), biotita y ortopiroxeno (15, 4, 4, 2 vol%, respectivamente) junto con escasos fenocristales de clinopiroxeno, cuarzo, olivino y óxidos de Fe-Ti (~1 vol% cada uno). El depósito de lava incluye también la presencia de enclaves afaníticos de composición andesítica (58 – 60 SiO₂ wt%), cuyas masas fundamentales presentan la misma mineralogía y química mineral de la masa fundamental de las muestras de lava, consistiendo en microfenocristales de anfíbol (Grupo 2) y microlitos de plagioclasa, piroxenos y óxidos de Fe-Ti. Abundantes texturas de disequilibrio fueron reconocidas en las muestras estudiadas tales como fenocristales de plagioclasa y cuarzo parcialmente reabsorbidos, descomposición de cristales de anfíbol y biotita, zonación inversa en fenocristales de piroxenos y plagioclasa, entre otras.

Variables intensivas (P, T, fO₂) y contenidos de H₂O fueron determinados a partir de condiciones de equilibrio en fenocristales y microlitos usando diferentes barómetros (Anderson and Smith 1995; Mutch et al. 2016), termómetros (Holland and Blundy 1994; Putirka 2008; Ghiorso and Evans 2008), oxibarómetros (Kress and Carmichael 1991; Sauerzapf et al. 2008) y modelamientos termodinámicos (Rhyolite-MELTS; Gualda et al. 2012). Presiones cercanas a los 2 kbar (1 – 3,3 kbar) fueron estimadas a partir de anfíboles y pares de anfíbol-plagioclasa pertenecientes al Grupo 1, mientras que un amplio rango de temperatura de 712 – 1.097 °C fue obtenido a partir de diferentes fases minerales. Las temperaturas mayores (905 – 1.097 °C) corresponden a fenocristales de piroxeno ricos en Mg (Mg#≥0.78) y plagioclasa rica en Ca (An≥66), mientras que las temperaturas menores entre los 712 y 788 °C corresponden a pares de anfíbol-plagioclasa (Grupo 1). La composición de los anfíboles del Grupo 1 y su cristalización a temperaturas cercanas al solidus indican una saturación a partir de un líquido evolucionado (63 – 79 SiO₂ wt%). Condiciones de oxidación en el rango de QFM+ 0,9 – 2,5 unidades logarítmicas fueron registradas en anfíboles (Grupo 1), microlitos de óxidos de Fe-Ti y enclaves. Adicionalmente, modelamientos realizados con Rhyolite-MELTS reproducen la composición de la mineralogía de alta temperatura a condiciones similares de P-T-fO₂ y 3,9 – 5,7 H₂O wt% para cristalizaciones en equilibrio con un fundido inicial con la composición de un enclave andesítico representativo.

Las texturas de disequilibrio observadas se podrían haber desarrollado después de la intrusión de un nuevo magma caliente con una composición similar a la de los enclaves dentro de un reservorio somero félsico tipo crystal-mush que se encontraba a temperaturas cercanas al solidus. En este escenario, las variaciones de temperatura podrían corresponder a un reservorio zonado con temperaturas decrecientes y contenidos de sílice crecientes hacia su techo. La inyección de un magma caliente en este reservorio somero y el subsecuente aumento de temperatura junto con la exsolución de volátiles podría haber generado la última erupción del volcán Azufre. Finalmente, de acuerdo con modelos de difusión en microlitos de óxidos de Fe-Ti, se registran temperaturas de enfriamiento entre 742 – 866 °C durante el emplazamiento de la lava a condiciones sub-aéreas.

Palabras Clave: Altiplano Puna Magma Body, crystal-mush reservoirs, magma mixing, magmatic enclaves, geothermal energy

Referencias:

- Anderson JL, Smith DR (1995) The effects of temperature and fO₂ on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80:549–559.
- Ghiorso MS, Evans BW (2008) Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer. *Am J Sci* 308:957–1039.
- Gualda GAR, Ghiorso MS, Lemons R v., Carley TL (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology* 53:875–890.
- Holland T, Blundy J (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116:433–447.
- Kress VC, Carmichael ISE (1991) The compressibility of silicate liquids containing Fe₂O₃ and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 108:82–92.
- Mutch EJF, Blundy JD, Tattitch BC, et al (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 171:85.
- Putirka KD (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. In: Putirka KD, Tepley III FJ (eds) *Minerals, Inclusions and Volcanic Processes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, pp 61–120.
- Sauerzapf U, Lattard D, Burchard M, Engelmann R (2008) The titanomagnetite-ilmenite equilibrium: New experimental data and thermo-oxybarometric application to the crystallization of basic to intermediate rocks. *Journal of Petrology* 49:1161–1185.
- Ward KM, Zandt G, Beck SL, et al (2014) Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions. *Earth Planet Sci Lett* 404:43–53.

Diversity of volcanism and evidence of discrete eruption centres in the Miocene Andes of Central Chile

Camila Andrea Leiva Gilberto¹, John Browning¹⁻², Carlos Marquardt¹⁻², Matías Clunes Squella¹, Matías Villarroel Lastra¹, Javier Espinosa-Leal¹, Constantino Mpodozis¹, Martin Meyer³, Ítalo Payacán³

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Av. Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

The geology of the Farellones region in the Andean Cordillera of central Chile, comprises a thick sequence of volcanic and volcanoclastic Miocene rocks. The occurrence of discrete eruption centres within this sequence, whilst suggested, has been enigmatic, such as the investigations from Beccar (1983), who indicated that the La Parva, Colorado, and El Pintor hills are sections of an eroded Miocene volcanic centre or Thiele et al. (1991) who described the Farellones Formation as a sequence of lavas and ash deposits with the uppermost member being a series of domes, laccoliths, considered to be remnants of stratovolcanoes, with no specific observations regarding the physical volcanology of these, despite observations of modern volcanic system concentration in the active volcanic arc to the southeast of the study area. We report a previously uncharacterized composite volcano that gave rise to a series of intercalated lava flows and pyroclastic deposits of basaltic to rhyolitic composition. Our observations describe eruptive sequences over 1.7 km in vertical section. Lateral continuity of units is interrupted by the presence of a major crustal fault, local eruptive centres and collapse events. We document a series of large pyroclastic volcanic products indicating gravitational collapse events as block and ash flows, which are overlain by rhyolitic pyroclastic density currents, ash fall and crystal, lithic and vitric tuffs, all making up more than 300 m of the sequence. A further 300 m thick sequence of spherulite-bearing rhyolitic lavas represent the upper most section of the Cerro Colorado volcano. Similar felsic domes collapsed over time to form the sequence of pyroclastic deposits found lower in the sequence.

Much of the sequence is cut by E-W and NW-SE striking andesitic and rhyolitic dikes. In the early stages of the construction of the western flank of the Cerro Colorado volcano, magmas and hydrothermal fluids interacted promoting local explosions and structural collapses developing the Quebrada Lunes maar-diatreme system. The main deposits of the eruptions that formed the maar are 700 m thick tuff and pyroclastic breccia layers, interbedded with andesitic lava flows which are intruded by dikes and sills, and the whole sequence is locally deformed by a series of normal faults. One of the dikes exhibits evidence of shallow conduit fragmentation in the form of internal pyroclastic textures. This pyroclastic dike is further evidence of magma-fluid interaction and related explosivity. Similar pyroclastic breccias have been described elsewhere as a cluster phenomenon and have been related to porphyry copper system genesis. Our results indicate that composite volcanoes of the Miocene in the Andes of Central Chile exhibited diverse volcanism and presented numerous distinct eruptive centres which are identifiable through careful mapping.

Keywords: Miocene Volcanism, maar-diatreme, rhyolitic domes, pyroclastic dike, Andes of Central Chile.

Acknowledgments: We thank the La Parva, Valle Nevado and Colorado ski centres for access to various sites. Much of this work was conducted with two Capstone programs and we thank the various students who participated.

References:

- Aguirre, L. (1960). Geología de los Andes de Chile central (provincia de Aconcagua): Santiago, Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín, No. 9, 70 p. (with map at scale 1:100,000).
- Beccar, I. (1983). Estudio geológico y petrográfico del área de Farellones—La Parva, Comuna de Las Condes, Región Metropolitana [Taller de título II]: Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 49 p.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M., & Muñoz, M. (2006). Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33-34 S). Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial, 6, 48-55.
- Piquer, J. (2015). Structural geology of the Andes of central Chile: controls on magmatism and the emplacement of giant ore deposits (Doctoral dissertation, University of Tasmania).
- Rivano, S., Godoy, E., Vergara, M., & Villarroel, R. (1990). Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34 S). Andean Geology, 17(2), 205-214.
- Thiele, R., Beccar, I., Levi, B., Nyström, J. O., & Vergara, M. (1991). Tertiary Andean volcanism in a caldera-graben setting. Geologische Rundschau, 80(1), 179-186. <https://doi.org/10.1007/BF01828775>
- Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S., Sepulveda, P., Thiele, R., & Drake, R. (1988). Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31° 30' S–34° 35' S). Journal of South American Earth Sciences, 1(2), 199-209.
- White, J. D., & Ross, P. S. (2011). Maar-diatreme volcanoes: A review. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 201(1-4), 1-29.
- White, J.D., (1996). Impure coolants and interaction dynamics of phreatomagmatic eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 74(3-4), pp.155-170.

Evolución en dos etapas de un reservorio bimodal: el caso de las lavas holocenas del volcán Lanín, Andes del Sur, Chile

Camila Morgan¹⁻², **Eduardo Morgado**³, Miguel Ángel Parada¹⁻², Raimundo Brahm⁴, Francisca Mallea-Lillo⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA-FONDAP 15090013), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 318, Providencia, Santiago, Chile

(4) Victoria University of Wellington, School of Geography, Environment & Earth Sciences, PO Box 600, Wellington 6140, Wellington, New Zealand

(5) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide 5005, Adelaide, Australia

El Lanín es un volcán compuesto ubicado en la Zona Volcánica Sur Central de los Andes (~39.38°S; 71.30°O). Se encuentra en el extremo austral del lineamiento noroeste (NO), junto a los volcanes Villarrica y Quetupillán. Su historia eruptiva comienza en el Plioceno tardío (unidad Lanín 1), continúa durante el Pleistoceno (unidad Lanín 2) y se extiende hasta el Holoceno (unidad Lanín 3). Durante el Holoceno, el volcán Lanín ha experimentado múltiples erupciones, emitiendo flujos de lava que clasificamos en tres grupos composicionales: BAT (basaltos, andesitas y traquiandesitas basálticas; 51.5-55.9 SiO₂ % en peso), intermedias (tranquiandesitas; 56-57.5 SiO₂ % en peso) y traquitas (59.03-63.51 SiO₂ % en peso). Tanto las muestras de composición BAT como las traquitas han sido descritas en estudios anteriores (Lara *et al.*, 2004; Balbis *et al.*, 2022). Sin embargo, este es el primer trabajo en reportar muestras de composición intermedia. Considerando todas las muestras, las principales fases minerales que se reconocieron en los productos estudiados son plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, óxidos de Fe-Ti y apatita. Las composiciones químicas de fases minerales, determinadas a través de microsonda electrónica, nos permitieron obtener las condiciones pre eruptivas del sistema magmático bajo el volcán Lanín en el Holoceno: temperatura (985 – 1.089°C; termómetro de dos piroxenos, Putirka, 2008), presión (1,8 – 4,1 kbar; equivalente a 6,5 – 15 km de profundidad; barómetro de clinopiroxeno, Wang *et al.*, 2021) y *buffer* de fugacidad de oxígeno (~ΔQFM +0,4; oxibarómetro de óxidos de Fe-Ti, Ghiorso & Evans, 2008). Las condiciones intensivas fueron similares para los cristales de todos los grupos composicionales de material volcánico estudiado.

Los cristales de plagioclasa registraron zonaciones complejas, que indicarían un proceso de calentamiento. Este proceso, sumado a la presencia de cúmulos cristalinos y los resultados de las condiciones pre eruptivas (como las altas temperaturas registradas en los óxidos de Fe-Ti), sugieren la existencia de un reservorio tipo *crystal mush* en corteza superior, el que se desarrolló en dos etapas. La primera etapa considera el emplazamiento del magma, desarrollo del *crystal mush* y erupciones de composición BAT. La segunda etapa involucra un fundido evolucionado de composición traquítica en el reservorio (resultado de la evolución del fundido inicial de composición BAT) y una intrusión de magma máfico más caliente desde abajo, el que genera calentamiento del fundido residual traquítico, rejuvenecimiento del *crystal mush* y generando una mezcla restringida entre ambos fundidos. Este último proceso generó la erupción de productos traquíticos y escasos productos de composición intermedia (debido a la mezcla entre fundidos de composición BAT y traquita). Todas estas etapas de desarrollo eruptivo ocurrieron en el mismo reservorio (a las presiones descritas anteriormente). Este modelo es consistente con los patrones continuos que se reconocen en los diagramas en que se grafican las concentraciones químicas (TAS y Harker). Finalmente, la presencia de un *crystal mush* dificultaría la mezcla entre los magmas de composiciones BAT y traquita, ya que podría funcionar como una barrera reológica: disminuyendo la posibilidad de mezcla de magma y favoreciendo, en su lugar, la transferencia de calor (a través de volátiles y conducción).

Palabras Clave: magmatismo bimodal, traquita, *crystal mush*, mezcla de magmas, calentamiento.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDAP-ANID 15090013: Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA).

Referencias:

- Balbis, C., Petrino, I. A., Hernando, I. R., & Brod, J. A. (2022). Bimodal Holocene flank eruptions at Lanín composite volcano, Southern Volcanic Zone of the Andes: Characterization of their deposits and controls on the vents array. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 429, 107610.
- Ghiorso, M. S., & Evans, B. W. (2008). Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer. *American Journal of science*, 308(9), 957-1039.
- Lara, L. E., Naranjo, J. A., & Moreno, H. (2004). Lanín volcano (39.5 S), Southern Andes: geology and morphostructural evolution. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 241-257.
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 69(1), 61-120.
- Wang, X., Hou, T., Wang, M., Zhang, C., Zhang, Z., Pan, R., Marxer, F., & Zhang, H. (2021). A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *European Journal of Mineralogy*, 33(5), 621-637.

DiffSim: Una nueva herramienta de código abierto para el cálculo de escalas de tiempo magmáticas a través de diffusion chronometry y elementos finitos en fases magmáticas

Eduardo Morgado¹, Daniel J. Morgan²

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 318, Providencia, Santiago, Chile

(2) University of Leeds, Institute of Geophysics and Tectonics, School of Earth and Environment, Leeds LS2 9JT, Leeds, United Kingdom

En los últimos años, la técnica *diffusion chronometry* ha suscitado un creciente interés en los campos de petrología ígnea y metamórfica. Esta poderosa herramienta ha permitido determinar escalas de tiempo de procesos geológicos. En particular, en volcanología, ha brindado valiosa información temporal sobre gatillantes eruptivos, movilización de magma, tiempos de residencia cortical, asimilación magmática, procesos syneruptivos y otras incógnitas que antes parecían inaccesibles. Sin embargo, los cálculos asociados a los procesos difusivos pueden resultar desafiantes y de alta complejidad, especialmente para aquellos usuarios sin experiencia previa en el tema. Con el objetivo de superar esta limitación, hemos desarrollado DiffSim (*Diffusion Simulator*), un *software* de libre distribución diseñado con una interfaz amigable y accesible. Este freeware resuelve la ecuación de la segunda ley de Fick, que describe la difusión en función del tiempo, y provee valores exactos de difusividad para elementos mayores en olivino, ortopiroxeno, titanomagnetita y fundidos silicatados basálticos. Este recurso está disponible como ejecutable y código abierto en MATLAB® y Python.

En primer lugar, el usuario deberá proporcionar los parámetros clave para iniciar el proceso de simulación. Estos incluyen la especificación el número de nodos, resolución temporal, número de iteraciones y las condiciones magmáticas preeruptivas: temperatura (para olivino, ortopiroxeno, titanomagnetita y fundido silicatado), presión (para olivino) y fugacidad de oxígeno (para olivino, titanomagnetita y ortopiroxeno). Según las especificaciones proporcionadas por el usuario, DiffSim genera elementos finitos a partir de nodos utilizando técnicas de interpolación para asegurar una representación precisa. A partir de las condiciones iniciales en términos de composición y distribución espacial, se llevan a cabo cálculos exhaustivos que consideran anisotropía de las fases (olivino y ortopiroxeno). En el caso de estas fases, DiffSim realiza cálculos de difusividad considerando el plano cristalográfico observado en una sección 2D (obtenido por el análisis en EBSD) y el ángulo de la travesa (o perfil composicional). Utilizando la información recolectada, DiffSim realiza cálculos iterativos, ajustándose a la resolución temporal y el número de iteraciones definidas por el usuario. Mediante el método de mínimos cuadrados, se evalúa y compara el valor obtenido en cada iteración. Como resultado, se selecciona aquella iteración que arroje el menor valor de mínimos cuadrados, representando así la solución temporal óptima obtenida a través de las iteraciones realizadas.

Palabras Clave: modelación numérica, difusión, escalas de tiempo magmáticas, procesos magmáticos.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto ANID - FONDECYT Iniciación (11230197).

De micrómetros a kilómetros: Evolución magmática y contexto regional de la erupción de 1835 del volcán Osorno (41°06'S), Andes del Sur, Chile

Eduardo Morgado¹, Daniel Morgan², Jason Harvey², Ángelo Castruccio³⁻⁴, Raimundo Brahm⁵, Lucy McGee⁶, Miguel Ángel Parada³⁻⁴

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 318, Providencia, Santiago, Chile

(2) University of Leeds, Institute of Geophysics and Tectonics, School of Earth and Environment, Leeds LS2 9JT, Leeds, United Kingdom

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA-FONDAP 15090013), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 303, Santiago

(5) Victoria University of Wellington, School of Geography, Environment & Earth Sciences, Te Herenga Waka, PO Box 600, Wellington 6140, Wellington, New Zealand

(6) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide 5005, Adelaide, Australia

El volcán Osorno (41°06'S, 72°20'O) es un volcán compuesto ubicado en la Zona Volcánica Sur Central de los Andes chilenos. Es el miembro más austral de un lineamiento de edificios volcánicos noreste (NE) junto con los volcanes Puntagudo y Cordón Cenizos. De acuerdo a las descripciones reportadas en 1835 por Charles Darwin, ocurrieron dos eventos eruptivos: el primero, en enero-febrero y el segundo, en noviembre-diciembre de 1835 y enero de 1836. Durante estos períodos, el volcán generó lavas y depósitos de caída de composición andesítico-basáltica (52,4 a 52,9 SiO₂ % en peso) que contienen fenocristales de olivino, plagioclasa, clinopiroxeno y espinela. A partir de las composiciones de estas fases, junto con aquellas de las inclusiones vítreas (todas las composiciones fueron medidas en microsonda electrónica), se determinaron algunos parámetros pre eruptivos. Estos entregaron temperaturas de 1.060°C a 1.140°C, con un *buffer* de fugacidad de oxígeno de $\sim \Delta QFM +1.1$, concentraciones de agua disuelta de hasta 5,6 % en peso (con un promedio de $\sim 4,2$ % en peso) y presiones máximas equivalentes a una profundidad de ~ 7 km. Las relaciones texturales, como cúmulos cristalinos, zonación compleja en cristales, y otros indicadores de desequilibrio, nos llevaron a inferir la existencia de un *crystal mush*, que sufrió ruptura e incorporación de cristales al magma transportador previo a la erupción.

En términos del contexto regional, las variaciones en el aporte de fluidos y el rol menor de la contaminación cortical en los productos eruptivos del Osorno y de los centros eruptivos cercanos (Calbuco y centros eruptivos menores Cayutué-La Viguería), se estudiaron a partir de abundancia de elementos traza (incluyendo tierras raras), elementos móviles e inmóviles en fluidos y las razones isotópicas de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr y ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd. Nuestros resultados sugieren una mayor contribución de fluidos desde la placa subductante y mayor grado de fusión parcial en los productos de volcanes compuestos (representados por Osorno, Calbuco y La Picada), relativo a los de centros eruptivos menores emplazados sobre la traza del sistema de fallas Liquiñe-Ofqui (representados por el cono La Viguería).

Palabras Clave: fugacidad de oxígeno, geotermobarometría, crystal mush, Zona Volcánica Sur.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDAP-ANID 15090013: Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Adicionalmente, EM fue financiado por el proyecto ANID - BECAS CHILE (número 72160268).

Química mineral del stock Yerba Loca, Chile central (~33.3°S): ¿Evidencias de sistemas magmáticos máficos transcorticales del Mioceno?

Javier Muñoz Sánchez¹, Macarena Moreno Lobo¹, Ítalo Payacán Payacán¹, Sebastián Santibáñez Flores²

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, ingeniería y tecnología, Av. Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El magmatismo Mioceno en Chile central (33-34°S) estuvo dominado por una intensa actividad volcánica de composición variable (basaltos a riolitas) registrada en los más de 5000 m de sucesiones volcánicas con facies sedimentarias subordinadas de la Fm. Abanico y Fm. Farellones. Durante el desarrollo de este volcanismo se registraron eventos freatomagmáticos (Leiva, 2023) hasta eventos constructivos (domos lava y estratovolcanes) registrados en las inmediaciones de Farellones-Yerba Loca. Adicionalmente, una serie de intrusivos dioríticos y graníticos, emplazados entre 15-10 Ma, intruyeron dichas sucesiones volcánicas en niveles superiores de la corteza. De acuerdo con estudios previos realizados por Payacán 2015 y Rodríguez 2022 basados en datos de fábricas magmáticas y geocronología (e.g., plutón La Gloria y La Obra), algunos de estos intrusivos podrían representar canales subhorizontales de magma emplazados a través de zonas de debilidad de la corteza deformada. Se ha propuesto que, asociados a estos, existirían zonas de ascenso de magma desde niveles más profundos de la corteza, representando conductos verticales ligados a grandes yacimientos de Cu-Mo. Evidencia de estos conductos de ascenso relativamente rápido son los intrusivos máficos con firmas isotópicas afines a señales mantélicas, como las del stock Yerba Loca (Deckart et al., 2010).

En esta contribución, se presentan datos de análisis mineral efectuados en el stock Yerba Loca, ubicado en la Cordillera Principal de Chile central, 30 km al noreste de Santiago, con el fin de identificar los procesos magmáticos ocurridos en el reservorio y estimar las profundidades de emplazamiento del magma durante su trayecto a través de la corteza. El stock corresponde a un **intrusivo máfico** con una orientación NE-SW, geometría ovalada de 3,5 km² aproximadamente y edades de cristalización entre $14,94 \pm 0,14$ y $15,4 \pm 0,5$ Ma (U-Pb en circones) (Deckart et al., 2010). El stock es composicional y texturalmente heterogéneo y se divide en tres unidades magmáticas, de más antigua a más joven, correspondientes a: (a) gabros-dioritas de piroxeno, las cuales afloran en los bordes del intrusivo; (b) monzodiorita de piroxeno, aflorando en el sector NE de este; (c) cuarzo-monzodiorita de piroxeno, la cual aflora en el sector NW.

Mediante análisis semicuantitativos utilizando **SEM-EDS** se determinó la **química mineral** de las principales fases que conforman al stock (plagioclasa, piroxeno y olivino subordinado). Los resultados muestran que el contenido de anortita del stock varía entre el rango An₃₀ hasta An₈₆. En cada unidad el espectro de An es continuo y se reconoce que las cuarzo-monzodioritas es la unidad que presenta el menor porcentaje promedio (An₂₆), seguida por monzodioritas (An₄₄) y finalmente gabros-dioritas (An₆₁). La composición de los piroxenos se ubica principalmente en el campo de la augita y algunos en el de la enstatita, con #Mg que varían entre 62 y 71, sin grandes variaciones entre las distintas unidades. Se logró medir la composición de cristales de olivino en los gabros, con valores de Fo₅₇₋₅₉.

La química mineral se utilizó para determinar las **condiciones intensivas de cristalización (temperatura y presión)**, con el método de Wang et al. (2021), correspondiente a un geotermómetro y geobarómetro basado en cristales de clinopiroxeno. Los resultados indican una cristalización entre 1.034 a 1.292 °C (primera y última etapa de cristalización magmática respectivamente), la cual es acotada y sin mayor variación entre las unidades del stock. Las estimaciones de presión muestran que los clinopiroxenos de las dioritas se equilibraron bajo presiones entre 1 y 6 kbar, equivalente a profundidades entre 1 y 18 km (cubriendo un rango continuo). Sin embargo, algunas rocas provenientes de diques emplazados en los gabros muestran presiones de hasta 10 kbar.

Nuestros resultados sugieren que los gabros representan magmas que ascendieron de manera casi directa desde niveles profundos de la corteza (1-18 km), los cuales representarían pulsos probablemente emplazados a través de conductos verticales, tal como sugieren las lineaciones magnéticas verticales obtenidas a través de AMS con valores de hasta 10%. Posteriormente, las rocas más diferenciadas del stock se emplazaron desde niveles menos profundos de la corteza, equilibrándose a menores profundidades (1-12 km) durante una etapa tardía de la evolución del sistema plutónico (~15 Ma). De esta forma, especulamos que las rocas máficas del stock representan pulsos iniciales provenientes de zonas profundas de la corteza, los cuales prepararon termalmente la corteza para hospedar los reservorios diferenciados y voluminosos de las etapas posteriores. La química mineral está siendo validada mediante técnicas cuantitativas de análisis mineral.

Palabras Clave: Intrusivo máfico, SEM-EDS, química mineral, condiciones intensivas, temperatura y presión.

Financiamiento: Financiamiento del proyecto FONDECYT N°1180577, The Fund for Publication Developments project [PEP I-2019071] granted by Universidad Mayor – Vicerrectoría.

Agradecimientos: Agradecimientos especiales a mi profesor Dr. Ítalo Payacán Payacán y al equipo de trabajo tras este estudio.

Referencias:

- Deckart, K., Godoy, E., Bertens, A., Jerez, D., & Saeed, A. (2010). Barren Miocene granitoids in the Central Andean metallogenic belt, Chile: Geochemistry and Nd-Hf and U-Pb isotope systematics. *Andean Geology*, 37(1), 1-31.
- Payacán, I. (2015). Estructura interna y dinámica de enfriamiento del plutón La Gloria, Chile Central: Un enfoque a partir de estudios magnéticos, petrográficos y modelación 166 numérica. MSc thesis. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Rodríguez, N. (2022). Emplazamiento del batolito La Obra y su relación con la deformación externa, Chile Central (33°35'S - 33°47'S): Inferencias desde el estudio de la fábrica magmática y microtexturas. Universidad Mayor, Santiago, Chile.
- Leiva Gilberto, C. A. (2023). Descifrando la volcanología física de secuencias volcánicas miocenas de Los Andes de Chile Central.

Petrogénesis del Basalto El Candado, Laguna del Maule

Luis Naranjo Mardones¹, Philippe Robidoux¹, Diego Morata¹, John Browning²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4686, Macul, Región Metropolitana, Santiago, Chile

El complejo volcánico Laguna del Maule es un campo volcánico chileno ubicado en la 7° región, caracterizado por una abundante presencia de vulcanismo riolítico, expresado actualmente en forma de una inflación constante del terreno bajo la laguna y desgasificación. Las erupciones holocenas han sido predominantes, siendo 44 de 130 eventos, consistiendo en material de composición dacítica-riolítica, fuertemente documentado debido a su relación con los peligros volcánicos. Pese a esto, existe vulcanismo basáltico-andesítico ubicado hacia el NW de la laguna, que, aunque está documentado, existe poca información respecto a su procedencia y a los procesos que lo originan. Con la finalidad de realizar una relación genética entre la cámara magmática existente actualmente y el mecanismo de generación de magmas máficos, se estudia un cono de salpicadura del Pleistoceno Superior (~60ka) llamado Basalto el Candado, ubicado a 1 km al oeste del paso fronterizo Pehuenche.

Se recurre a una serie de estudios geoquímicos y petrológicos: Petrología en muestras de mano y cortes transparentes (9 muestras), análisis de roca total mediante fusión de litio (9 muestras), y análisis de microsonda electrónica EMPA (19 muestras). Además, se realiza una salida a terreno generando un mapa de las morfologías volcánicas asociadas al cono, identificando dos tipos de estructuras volcánicas: productos volcánicos consistentes en rocas muy vesiculares y con texturas grumosas, y rocas más compactas asociadas a un sistema de diques (3 diques en direcciones NE-SW, NW-SW y NS).

La información petrológica otorga rocas consistentes en basaltos/andesitas (clasificación de Streckeisen), con un contenido mineralógico de plagioclasa, augita y olivino, con rara aparición de enstatita. Las muestras poseen dos modos texturales: productos extrusivos con masa fundamental vítrea, predominando las texturas vitrofírica, traquítica e intersertal; y muestras de diques, con baja contenido de vidrio, y con texturas intergranulares. De los elementos mayores se extrae que las muestras oscilan entre composiciones de basalto a andesitas basálticas, pasando a andesitas para los datos EMPA (48-54%wt SiO₂ y 0,85-1,31%wt K₂O bulk rock, 57-63%wt SiO₂ y 2,4-5,1%wt K₂O EMPA) correspondientes a la serie subalcalina, con algunas muestras de composiciones de basalto alcalino/traquibasalto. En cuanto al contenido absoluto de elementos mayores, con respecto al centros de la zona volcánica sur, presentan niveles mayores (%wt) de TiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO y FeO, niveles bajos de K₂O y Na₂O, y un nivel constante de P₂O₅. Se obtiene un contenido de elementos traza similar a las encontradas a nivel regional, apreciándose un enriquecimiento proporcional respecto a los datos distritales, sobre todo los HREE. Las clasificaciones de Cabanis, 1989 (La/10-Y/15-Nb/8, valores respectivos de 49-59% La/10, 23-36% Y/15 y 14-19% Nb/8), y de Hollocher, 2012 (La/Yb vs Nb'/La, otorgando datos de 8,3-12,3 vs 0,09-0,52, y La/Yb vs Th/Nb, otorgando datos de 8,3-12,3 vs 0,6-1,1) otorgan firmas de arco continental, y dos datos de arcos alcalinos. En cuanto a las anomalías de Eu/Eu*, se presentan dos modos, una con firmas de corteza intermedia (0,8-0,9, muestras de productos eruptivos) y otra con firma de corteza inferior (1,1-1,3, muestras del complejo intrusivo) (Niu et al, 2009). Respecto a geotermobarometría (Putirka, 2008), se someten los datos de EMPA a geotermómetros de Líquido, MgO, Ol-Liq, Cpx-Liq y Plg-Liq, y a barómetros de Cpx-Liq y Plg-Liq. Las temperaturas van entre los rangos de 920-1.100 °C, dando a entender un proceso de cristalización en equilibrio de Plg-Aug (1.128,6±16,7°C) y de olivino tardío (1.025,8±98,3°C). Los datos de barometría otorgan una presión de formación de 3,9 kbar (barómetros de Plg-Liq y Cpx-Liq, insensibles al contenido de H₂O), correspondientes a una profundidad aproximada de 14,7 km.

Como resultados preliminares, las rocas del sistema de diques y los productos eruptivos poseen firmas químicas muy similares, aunque con leves diferencias que indican orígenes distintos, como el que las rocas del intrusivo pertenecen a la serie alcalina, con firmas de Eu* de corteza inferior, mientras que las muestras de productos eruptivos pertenecen a la serie subalcalina, al igual que el resto de rocas de Laguna del Maule, con firmas Eu* de corteza intermedia. Además, existe una clara discrepancia entre la profundidad calculada de 14,7 kms y la reportada de la cámara holocena, correspondiente a 5 km (Singer et al, 2014), por lo cual es posible concluir que su origen proviene de una cámara magmática distinta, más profunda que la cámara holocena, y que en caso de eventos eruptivos, no se asemejaría ni en productos ni en estilo eruptivo a los de El Candado.

Palabras Clave: vulcanismo, laguna del maule, petrología, geoquímica, vulcanismo de arco.

Financiamiento: Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes CEGA (Fondap N° ACE210005), y el Fondecyt Iniciación N°11190846 "Monitoreo multidisciplinario de gases y enfoque petrológico para identificar fuente magmática de volcanes activos en la Zona Volcánica Sur (SVZ)".

Agradecimientos: Agradecimientos al CEGA, a mis profesores Philippe Robidoux y Diego Morata, y a mi familia: Bernardita, Luis y Valentina.

Referencias:

- Cáceres Acevedo, F. A. (2016). Magma storage conditions and eruptive dynamics of postglacial effusive volcanism at laguna del maule volcanic field. Repositorio Universidad de Chile.
- Cardona Idárraga, C. E. (2018). Modelo de fuente de sismicidad volcánica y su relación con deformación cortical de gran escala en un sistema riolítico complejo volcánico laguna del maule (Tesis Doctoral). Universidad de Concepción.
- Drake, R. E. (1976, nov). Chronology of cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes — latitudes 35° 30' to 36° S. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1(3) 265–284. [doi.org/10.1016/0377-0273\(76\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(76)90011-1)

- Hildreth, W. (2010). Laguna del maule volcanic field: Eruptive history of a quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the andean rangecrest in central Chile. SERNAGEOMIN.
- Hildreth, W., y Moorbath, S. (1988). Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98 (4), 455–489. [doi: 10.1007/BF00372365](https://doi.org/10.1007/BF00372365).
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G., y Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics*, 680, 192–210. [doi: 10.1016/j.tecto.2016.05.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.016).
- Peterson, D. E., Garibaldi, N., Keranen, K., Tikoff, B., Miller, C., Lara, L. E., Lanza, F. (2020, aug). Active Normal Faulting, Diking, and Doming Above the Rapidly Inflating Laguna del Maule Volcanic Field, Chile, Imaged With CHIRP, Magnetic, and Focal Mechanism Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125 (8). [doi: 10.1029/2019JB019329](https://doi.org/10.1029/2019JB019329).
- Stern, C. R. (2004, dec). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, 31 (2), 161–206. [doi: 10.4067/S0716-02082004000200001](https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001).

Evolución magmática del Grupo Descabezados, Región del Maule (34°41'S-36°33'S), Chile. A partir de análisis estadístico multivariable de datos geoquímico de lavas y tefra

Nicolás Orellana Silva¹, Franco Vera Rivadeneira², José Luis Palma Lizana¹

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Geología General, Unidad de Geología y Sistemas de Peligros Volcánicos, San Martín 1295, Concepción, Chile

La zona de estudio se ubica en la Región del Maule, entre las latitudes 34°41' a 36°33' sur, en la Cordillera de los Andes. Esta área forma parte de la zona volcánica sur (SVZ) del arco volcánico andino y destaca por ser la zona de mayor actividad magmática dentro de este arco. Específicamente, esta región se ubica en el segmento transicional de la zona volcánica sur (TSVZ), la cual se caracteriza por presentar estratovolcanes compuestos, calderas y grandes complejos volcánicos que se superponen a antiguos volcanes de escudo basáltico (Stern et al., 2007). Este sector posee una de las mayores áreas de depósitos volcánicos de TSVZ de Chile las cuales corresponden a los complejos volcánicos Caldera Calabozos, Laguna del Maule y Grupo Descabezados, que en conjunto llegan a contener más de 200 fumarolas, estratovolcanes, cráteres, conos de escoria, domos y maares (González-Ferrán, 1994).

El Grupo Descabezados, se define como un conjunto de centros eruptivos que abarca al complejo eruptivo Quizapu-Cerro Azul-Descabezado Grande, junto con otros centros aledaños que son relevantes en la zona y para este estudio. Entre los centros eruptivos destacan algunos como Hornitos, Quizapú, Resolana, Alto las Mulas y Manantial Pelado.

En cuanto a la variabilidad composicional del Grupo Descabezados, se registran erupciones desde magmas basálticos hasta riolíticos, con una predominancia de andesitas y dacitas (Hildreth & Drake, 1992). La composición química de las rocas volcánicas estudiadas en la zona varía considerablemente de un centro volcánico a otro, existiendo diferencias incluso entre centros pertenecientes a grupos de volcanes afines (Salas et al., 2016).

Diferentes estudios en la zona han indicado variaciones en las concentraciones de los elementos mayores entre los centros eruptivos, como se evidencia claramente en el caso del volcán Quizapu y los cráteres Hornitos y Resolana. Siendo estos volcanes considerados adventicios del volcán Cerro Azul, se esperaría encontrar una tendencia similar en las concentraciones de elementos entre ellos. Sin embargo, los depósitos provenientes de los volcanes Hornitos y Resolana muestran una mayor concentración de los elementos de Fe y Mg en comparación con el volcán Quizapu, lo que indica que sus magmas son menos diferenciados (Salas et al., 2016).

Dado que la zona presenta una amplia variabilidad de depósitos y composiciones de roca, y la distancia entre los centros eruptivos es relativamente corta, identificar la procedencia de algunos depósitos se vuelve difícil. Por lo tanto, resulta esencial llevar a cabo una caracterización y correlación geoquímica de los centros eruptivos para poder diferenciar el origen de estos depósitos.

Para este trabajo se han utilizado datos geoquímicos entregados por SERNAGEOMIN, junto con la recopilación de datos bibliográficos que incluyen elementos mayores, elementos trazas y tierras raras; para analizar los depósitos de tefra y lavas pertenecientes a diversos centros volcánicos asociados al Grupo Descabezado. Se ha desarrollado una base de datos tabular en formato CVS, organizada en diversas categorías, que incluyen campos de información como la procedencia, tipo de depósito, ubicación geográfica, entre otros aspectos relevantes. Todo esto para realizar una posterior caracterización química a través de Python, incluyendo diagramas de TAS, AFM y diagramas de Harker.

Posteriormente, por medio de un análisis multivariable, a través de procesamiento de datos en Python; se busca identificar similitudes y diferencias mediante una caracterización de tendencia de datos a través de un punto de vista estadístico.

Con esto se observa que todos los centros eruptivos, con excepción de Hornitos, siguen tendencias similares en los elementos mayores a medida que se va diferenciando la roca, no habiendo una dispersión importante. La diferencia más notoria es el Mg donde los rangos para la mayoría de los centros eruptivos varían de 8 a 1 wt%, mientras que para Hornitos los valores varían de 16 a 12 wt%.

Para el caso de los elementos trazas y tierras raras, no se observa un patrón en común, la dispersión y tendencia de los datos depende del elemento y el centro eruptivo. Para el V los centros eruptivos siguen una tendencia que varía de ~250 a 5 ppm, mientras que el volcán Quizapu presenta una tendencia ~20 ppm para todas las composiciones. Para el Y, en cambio, el volcán Descabezado Grande es el que se escapa de la tendencia con valores que van desde los ~410 a 50 ppm, mientras que el resto de los centros siguen valores entre los ~50 a 10 ppm.

Así los diferentes patrones y tendencias en los datos químicos de los depósitos de tefra y lava permiten caracterizar los centros eruptivos y, al mismo tiempo, establecer correlaciones con otros volcanes dentro del Grupo Descabezado.

Palabras Clave: Geoquímica, Maule, Descabezados, Volcanología, Depósitos volcánicos.

Referencias:

- Bellver-Baca, M. T., Chiaradia, M., Beate, B., Beguelin, P., Deriaz, B., Mendez-Chazarra, N., & Villagómez, D. (2020). Geochemical evolution of the Quaternary Chachimbiro Volcanic Complex (frontal volcanic arc of Ecuador). *Lithos*, 356, 105237.
- Brenna, M., Cronin, S. J., Smith, I. E., Sohn, Y. K., & Maas, R. (2012). Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337-352.
- Dungan, M. A., Wulff, A., & Thompson, R. E. N. (2001). Eruptive stratigraphy of the Tatara-San Pedro complex, 36 S, Southern Volcanic Zone, Chilean Andes: reconstruction method and implications for magma evolution at long-lived arc volcanic centers. *Journal of Petrology*, 42(3), 555-626.

- González-Ferran, O. (1994). Volcanes de Chile, Inst. Geográfico Militar. Santiago de Chile, 640, 294-324.
- Hildreth, W., & Drake, R. E. (1992). Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 93-125.
- Iwamori, H., Yoshida, K., Nakamura, H., Kuwatani, T., Hamada, M., Haraguchi, S., & Ueki, K. (2017). Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(3), 994-1012.
- Rollinson, H. R., Rollinson, H., & Pease, V. (2021). *Using geochemical data: To understand geological processes*. Cambridge University Press.
- Salas, P. A., Rabbia, O. M., Hernández, L. B., & Ruprecht, P. (2017). Mafic monogenetic vents at the Descabezado Grande volcanic field (35.5 S–70.8 W): the northernmost evidence of regional primitive volcanism in the Southern Volcanic Zone of Chile. *International Journal of Earth Sciences*, 106, 1107-1121.
- Stern, C. R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J. E., Lara, L. E., Naranjo, J. A., ... & Skewes, M. A. (2007). Chilean volcanoes.

Condiciones pre eruptivas de los depósitos de caída holocenos de la unidad Volcán Hornopirén 3, Volcán Hornopirén (41°52'53"S / 72°26'02"O)

Sebastián Pérez-Órdenes¹, Eduardo Morgado Bravo¹

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

El Hornopirén es un volcán compuesto activo ubicado en la Región de los Lagos, en la provincia de Palena, comuna de Hualaihué, Chile. Este volcán ocupa el lugar 24 en el ranking de riesgo específico de Volcanes Activos en Chile (Sernageomin, 2019). Se encuentra en la Zona Volcánica Sur-Sur y está ubicado sobre la traza de la Zona de Falla Liquiñe Ofqui. El Volcán Hornopirén dentro de su historia eruptiva ha tenido erupciones desde el Pleistoceno al Holoceno, con una actividad eruptiva reciente poco certera careciendo de columna eruptiva, tipo de erupción o productos asociados (Mella et al., 2021). La Unidad Hornopirén 3 descrita por Mella et al. (2021), se caracteriza por productos volcánicos compuestos por depósitos de caída y flujos de lavas de composición andesítica basáltica, las cuales se componen de plagioclasa, piroxeno, olivino y espinela. Estos depósitos han sido poco estudiados y dado que el Volcán Hornopirén ha presentado signos de actividad sísmica volcano-tectónica en la última década, los peligros volcánicos asociados significan un riesgo para la localidades e infraestructuras cercanas expuestas, aproximadamente 12 km al sur. Esta también es relevante debido a su papel clave en la conectividad de la Carretera Austral.

La obtención de condiciones pre eruptivas permitirían conocer las diferentes condiciones de equilibrio (temperatura, presión, fugacidad de oxígeno y contenido de agua disuelta) en el sistema magmático bajo el volcán. A partir de ello, se podrá reproducir el escenario magmático en el que se encontraba el reservorio magmático previo a la erupción que dio origen a los productos volcánicos de la unidad "Volcán Hornopirén 3", permitiendo entender sus características y definir la reología de sus productos.

Mediante el análisis de química mineral y termobarometría, se encontraron presiones consistentes con corteza superior, temperaturas entre 1.050 y 1.100°C, con buffer de fO_2 entre QFM y $\Delta QFM+1$ y un contenido de agua disuelta (H_2O) de hasta un 4% (en peso).

Palabras Clave: Volcán Hornopirén, Zona Volcánica Sur, Termobarometría, Fugacidad de oxígeno, Contenido de agua disuelta.

Financiamiento: FONDECYT Iniciación (N° 11230197).

Referencias:

- Mella, M., Toloza, V., Bertin, L. 2021. Peligros del volcán Hornopirén, región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 37: 51 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2019). Nuevo Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile. https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019_Tabla_Final.pdf.

Pre-eruptive parameters and magmatic processes of explosive eruptions at Lonquimay volcanic complex, IX Region, Southern Andes of Chile

Matías Poblete¹, Ángelo Castruccio¹⁻², Patricia Larrea¹⁻², Francisco Cáceres³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Ludwig Maximilians-Universität, Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Geosciences, Theresienstrasse 41, 80333, München, Alemania

Lonquimay volcanic complex (LVC, 38°22' S, 71°35' W) is located in the Southern Volcanic Zone of the Andes, in the northern segment of the Liquiñe-Ofqui fault system. It consists of a primarily andesitic main stratocone and Cordón Fisural Oriental (CFO), a SW-NE fissure system of about 12 eruptive centers of basaltic andesite to dacite products [2, 3, 5, 6]. The LVC has been active since the Middle Pleistocene and has generated explosive and effusive eruptions that exhibit strombolian to sub-Plinian eruptive styles with VEI 2-4 [2].

In this work, we analyzed tephra fall deposits associated with 3 recent Holocene explosive eruptions: La Negra (FDLN) of basaltic andesitic composition, Pewenkura (FDPK) of dacite composition and Manto Amarillo (FDMA) of andesitic composition [1, 4], as well as 7 lava flows related to units from both the main stratocone and the CFO. The tephra fall deposits are very distinctive: FDLN is composed of irregular and vesicular black scoria with abundant volcanic lithic fragments, forming several levels of varying grain sizes and thicknesses. FDPK comprises a thick (up to 2.2 m) basal layer of pale pink pumice (usually with scoria bands) transitioning to a thinner upper layer of dense black scoria, forming a normal grading deposit that concentrates abnormally large fragments (up to 40 cm 8 km from the vent) at the base, and grey scoria in the transition zone. FDMA consists almost exclusively of pale-yellow, angular pumice with large vesicles, forming a homogeneous deposit.

Isopach maps for these tephra fall deposits demonstrate a general eastward dispersion pattern and similar volumes based on the current models for tephra dispersal. FDLN has a volume of 0.23 km³ with an ESE dispersion axis. FDPK has a volume of 0.20 km³ and an E dispersion axis. Finally, FDMA has a volume of 0.24 km³ and an ENE dispersion axis. The eruptive vent for the 3 eruptions is the summit of the main stratocone.

Petrographic analyses of the juvenile fragments reveal vitrophyric rocks with abundant disequilibrium textures. FDLN exhibits abundant spherical vesicles indicating extensive coalescence, and it contains phenocrysts of plagioclase, olivine, and pyroxene with embayments and sieve textures. In contrast, same analyses for the two main groups of FDPK reveal that the pumice contains stretched and orientated vesicles, phenocrysts of plagioclase, orthopyroxene and olivine forming cumulus texture, while the scoriae is composed of phenocrysts of plagioclase, olivine, and pyroxene displaying subofitic, embayments, and rapid cooling textures. FDMA exhibits a general fragmented texture characterized by phenocrysts of skeletal and fragmented plagioclase with sieve and poikilitic textures, along with olivine inclusions. It also contains highly birefringent zoned olivine and abundant secondary minerals.

Physical characterization of deposits and textural analyses of juvenile fragments suggest that the eruption of FDPK was triggered by a mafic magma injection in the accumulation zone of the magma that generated this deposit. It is possible that this mafic injection may have originated from the same magma that produced FDLN. Subsequent magma evolution and homogenization may have generated FDMA. The previous hypothesis will be tested through ongoing studies of pre-eruptive conditions (P, T, and H₂O contents) and trace element concentrations.

Keywords: Cordón Fisural Oriental, Tephra fall deposits, Magma mixing, Magmatic plumbing system.

Financing: Financial support was provided by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) FONDECYT regular Folio 1211869 granted to A. Castruccio.

References:

- [1] Bustamante, O. (2013). Dispersión de tefra de erupciones explosivas holocenas del Complejo Volcánico Lonquimay, Región de la Araucanía, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.
- [2] Moreno, H., & Gardeweg, M. C. (1989). La erupción reciente en el complejo volcánico Lonquimay (Diciembre 1988), Andes del Sur. *Andean Geology*, 16(1), 93-117.
- [3] Moreno, H., Naranjo, J., Polanco, E. 2012. Geología del complejo volcánico Lonquimay-Tolhuaca. Carta Geológica de Chile 1:50.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- [4] Polanco, E. (1998). Volcanismo Explosivo Postglacial de la Cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45'-38°30'S). Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- [5] Polanco, E. (2010). Volcanoestratigrafía, geoquímica y peligro volcánico del volcán Lonquimay (38°30'S), Andes del Sur (Chile). Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- [6] Thiele R., Lahsen A., Moreno H., Varela J., Vergara M. & Munizaga F. (1987). Estudio Geológico Regional a Escala 1:100.000 de la hoya superior, curso medio del río Biobío. Empresa Nacional de Electricidad-Departamento de Geología, Geofísica, Universidad de Chile (Informe Inédito), 304 p.

Nuevas edades U-Pb del volcanismo explosivo evolucionado del Oligo-Mioceno Inferior en el Altiplano de la Región de Arica y Parinacota: implicancias en la evolución de los Andes Centrales

Edmundo Polanco Valenzuela¹, Rodrigo Arcos Rojas¹, Edwin González¹, Francisco Hevia-Cruz², Claudio Tapia³

(1) Servicio Nacional de Geología (SERNAGEOMIN), Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Av. Santa María 0104 Providencia, Santiago, Chile

(2) Université Paris-Saclay, Laboratoire GEOPS, UMR8148, Orsay, F-91405, France

(3) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Cíviles y Geología, Campus San Juan Pablo Segundo, Av. Rudecindo Ortega 02950, Temuco, Chile

Introducción

El Altiplano, con un espesor cortical de ca. 70 km, es producto del acortamiento y alzamiento de la Placa Sudamericana en los Andes Centrales, que se inicia en el Oligo-Mioceno y da lugar a una de las mesetas más altas del planeta en un ambiente de subducción (e.g. Charrier *et al.*, 2009; de Silva y Kay, 2022). Dicho proceso geológico está acompañado de un intenso volcanismo explosivo riolítico y dacítico de gigantesco volumen (flare-up: e.g. de Silva y Kay 2018; Wörner *et al.*, 2020) que ha dado origen a ignimbritas de gran volumen (e.g. van Zalingue *et al.*, 2016; 2017). Las ignimbritas del Oligo-Mioceno Inferior de la Región de Arica y Parinacota (y extensivo al sur del Perú y suroeste de Bolivia) están asociadas al colapso de una estructura de caldera que se ubica varias decenas a cientos de kilómetros al este, hoy territorio boliviano, aunque continúa pendiente la tarea de su localización. En particular, el volcanismo explosivo evolucionado del Oligo-Mioceno de esta región está representado esencialmente por ignimbritas de la Formación de Oxaya (e.g. Montecinos 1966; García *et al.*, 2004; Wörner *et al.*, 2022; van Zalingue *et al.*, 2016), que se inicia con la Ignimbrita Poconchile de ca. 22,8-22,7 Ma (van Zalingue *et al.*, 2016). No obstante, Arcos *et al.* (2018) excluyen la Ignimbrita Poconchile de la Formación Oxaya, dado que evidencias de terreno en la quebrada Lluta señalan que la secuencia sedimentaria supra ignimbrita es parte de la Formación Azapa. De esta forma, las ignimbritas están incluidas dentro de las formaciones Azapa (Ignimbrita Poconchile) y Oxaya (ignimbritas Cardones, Molinos, Oxaya, Sucuna y Aico).

En el marco de la Carta Codpa se recolectaron y seleccionaron muestras de roca de tobas del Oligo-Mioceno Inferior para realizar dataciones radiométricas U-Pb en circones con el objetivo de resolver problemas en la estratigrafía de las ignimbritas, en especial, de las que sólo se disponía de edades K-Ar en biotita que, en general, presentan problemas de exactitud. En este sentido, la presente contribución discute los resultados radiométricos obtenidos y se comparan con las edades publicadas por García *et al.* (2004) y van Zalingue *et al.* (2016) y señala algunas de las implicancias en la evolución de este segmento del territorio.

Ignimbritas del Oligo-Mioceno Inferior

Las ignimbritas del Oligo-Mioceno Inferior corresponden litológicamente a tobas de gran volumen con distinto grados de soldamiento (de nulo a soldadas), de colores blanco, blanco rosáceo, pardo rosáceo, pardo pálido y gris pálido, con contenido variable de fragmentos de pómez y líticos en una matriz de vidrio de tamaño ceniza y cristales. Se describen sucintamente de más antigua a más joven las ignimbritas: Poconchile, Cardones, Molino, Oxaya, Sucuna y Aico.

Ignimbrita Poconchile

Toba de color blanco rosáceo a blanco de pómez y cristales (plagioclasa-cuarzo-biotita) inmersos en una matriz de vítrea de ceniza. A unos 190 km al suroeste de la localidad de Poconchile se exponen más de 20 metros de potencia de esta ignimbrita, donde se obtuvo edades de $23,7 \pm 0,8$ y $23,7 \pm 0,5$ Ma (K-Ar en biotita; García *et al.*, 2004). No obstante, García *et al.* (2004) obtienen edades en tobas de la Formación Azapa de $24,6 \pm 0,6$ y $24,3 \pm 0,3$ (Ar/Ar en sanidina y biotita, respectivamente), coincidente con una edad obtenida por BHP Billiton en sus exploraciones en la región y que deberían corresponder a esta ignimbrita. Por su parte, van Zalingue *et al.* (2016) obtienen una edad de ca. 22,7 Ma para esta unidad, aunque es discutible dada su posición estratigráfica.

Ignimbrita Cardones

Toba soldada de color blanco a pardo pálido de cristales (plagioclasa, cuarzo y biotita $\pm$ anfíbola) y vidrio tamaño, ceniza con escasas pómez riolíticas y dacíticas, y fiammes alargadas. García *et al.* (2004) obtienen edades en biotita entre $25,5 \pm 0,6$ y $19,3 \pm 0,6$ (Ar/Ar y K-Ar, respectivamente). No obstante, van Zalingue *et al.* (2016) restringe la edad para esta ignimbrita a ca. 22,0-21,9 Ma.

Ignimbrita Molinos

Toba escasa a medianamente soldada de color pardo rosácea y gris pálido de cristales (plagioclasa, biotita, cuarzo y anfíbola) con pómez y fragmentos líticos inmersos en una matriz vítrea de ceniza y cristales. García *et al.* (2004) obtienen edades entre 23,1 y 22,4 Ma (K-Ar en biotita) para esta ignimbrita.

Ignimbritas Oxaya

Toba bien a medianamente soldada, de color pardo rosáceo, gris pálido y blanco, de cristales (plagioclasa, biotita, cuarzo, sanidina $\pm$ anfíbola) y pómez (y fiammes cuando está soldada) en una matriz vítrea de ceniza y cristales. Tiene una edad muy bien restringida de ca. 19,8-19,6 Ma (U-Pb en circón; van Zalingue *et al.*, 2016) coincidente con las edades Ar/Ar de $19,7 \pm 0,2$ y $19,7 \pm 0,7$ Ma (sanidina y anfíbola; García *et al.*, 2004 y Arcos *et al.*, 2018, respectivamente).

Ignimbrita Sucuna

Toba de variable grado de soldamiento (soldada a no soldada), de color blanco a blanco rosáceo, de cristales (plagioclasa, biotita, cuarzo y escasa anfíbola) y ceniza con pómez de lapilli y escasos líticos. Se dispone de una edad de $19,3 \pm 0,8$ Ma (K-Ar en biotita; García *et al.*, 2004).

Ignimbrita Aico

Toba medianamente a no soldada de color gris pálido a blanco rosáceo de pómez dacíticas (con cristales de plagioclasa, biotita, cuarzo y anfíbola) de hasta 25 cm de diámetro y rica en líticos de hasta 5 cm, inmersos en una matriz de ceniza vítrea y cristales. Presenta sectores ricos en pómez vesiculares densas que alcanzan hasta 30-40 cm de diámetro. Se dispone de una edad de $16,9 \pm 0,5$ Ma (K-Ar en biotita; García et al., 2004).

Nuevas edades U-Pb

Se obtuvo 17 nuevas edades U-Pb en circones (Tabla 1), realizadas en el Laboratorio de Geología Isotópica de SERNAGEOMIN y en el Centro de Investigación de Depósitos Minerales y Ciencias de la Tierra de la Universidad de Tasmania (Australia).

Tabla 1. Edades U-Pb en circones de las ignimbritas de gran volumen del Oligo-Mioceno Inferior de la Región de Arica y Parinacota.

Muestra	Ignimbrita	UTM E	UTM N	Edad (Ma $\pm 2\sigma$)
CEP-42d	Poconchile	444.326	7.906.435	24,8 $\pm 0,1$
CEP-41d	Poconchile	444.475	7.906.066	24,8 $\pm 0,8$
CEP-36d	Cardones	439.640	7.906.354	23,2 $\pm 0,2$
CEP-35d	Molinos	441.139	7.908.314	22,1 $\pm 0,2$
CR-38d	Oxaya	427.417	7.918.223	19,7 $\pm 0,2$
CR-64d	Oxaya	430.506	7.941.770	19,7 $\pm 0,1$
CF-20d	Oxaya	394.447	7.894.255	19,6 $\pm 0,1$
CF-54d	Oxaya	396.275	7.951.869	19,5 $\pm 0,1$
CR-02d	Oxaya	421.537	7.920.727	19,5 $\pm 0,1$
CR-10d	Oxaya	427.087	7.913.560	19,3 $\pm 0,1$
CR-06d	Sucuna	418.008	7.927.136	19,6 $\pm 0,1$
CR-17d	Sucuna	422.801	7.916.338	19,4 $\pm 0,1$
CR-60d	Sucuna	411.325	7.942.194	19,3 $\pm 0,1$
CEP-81d	Sucuna	448.716	7.920.057	18,88 $\pm 0,31$
CEP-80d	Sucuna	438.089	7.915.958	18,77 $\pm 0,33$
CR-05d	Aico	446.101	7.925.693	18,9 $\pm 0,1$
CEP-03d	Aico	446.854	7.919.821	18,6 $\pm 0,1$

Se realizó un diagrama de síntesis de las edades U-Pb en circones (Figura 1) de las 6 ignimbritas (Poconchile, Cardones, Molinos, Oxaya, Sucuna y Aico; Arcos et al., en elaboración), donde además se agregaron las precisas, pero no necesariamente exactas, edades U-Pb de van Zalingue et al. (2016) y algunas de las edades K-Ar y Ar/Ar de García et al. (2004), con el objetivo de proponer una cronoestratigrafía de ignimbritas coherente.

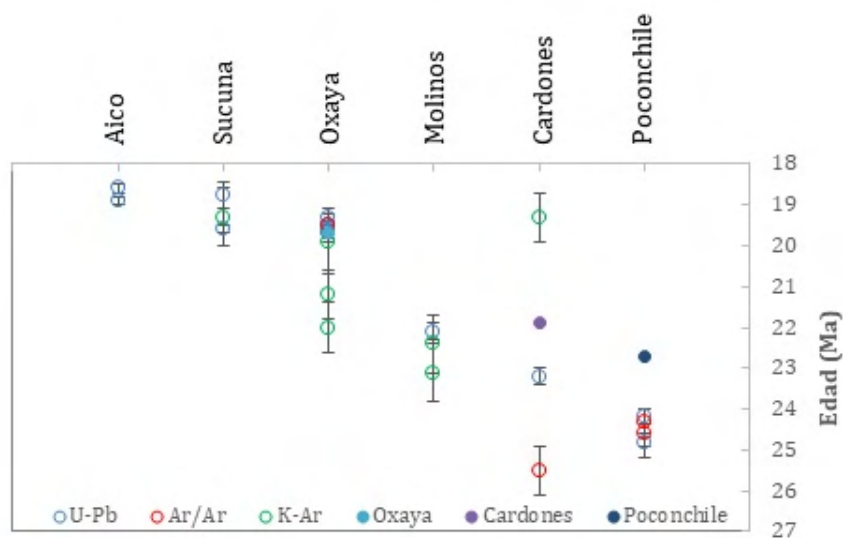


Figura 1. Diagrama de las edades U-Pb de las ignimbritas del Oligo-Mioceno Inferior en la Región de Arica y Parinacota. Se incluyen edades Ar/Ar y K-Ar de la Hoja Arica (García et al., 2004). Los círculos llenos corresponden a las edades U-Pb, de van Zalingue et al. (2016).

Uno de los primeros resultados de las nuevas edades U-Pb en circones de la Ignimbrita Aico es restringirla a ca. 18,9-18,6 Ma (Arcos *et al.*, en elaboración). Esto permite descartar la edad K-Ar en biotita de 16,9 Ma por un rejuvenecimiento termal, explicado por escape de Ar radiogénico. Dado lo anterior, es necesario restringir a ca. 19,6-19 Ma la ignimbrita Sucuna.

Por su parte, se obtuvieron 6 edades de la Ignimbrita Oxaya, de las cuales 5 son concordantes con la edad de ca. 19,8-19,6 Ma de van Zalingue *et al.* (2016). En este caso, las edades K-Ar más antiguas se pueden explicar por la desgasificación incompleta de cristales heredados pre-eruptivos (con un consecuente exceso de Ar) o por el entrapamiento de argón atmosféricos.

Por otro lado, las nuevas edades de ca. 24,8 y 23,2 Ma de las ignimbritas Poconchile y Cardones (Figura 1) resultan ser más antiguas que las edades de 22,8-22,7 y 22-21,9 Ma de van Zalingue *et al.* (2016). Una explicación posible es que en la estratigrafía de la quebrada Lluta se haya “perdido” la Ignimbrita Molino. De esta forma, el intervalo de 22,8-22,7 Ma es casi concordante con la edad de ca. 23,2 Ma de la Ignimbrita Cardones y, de la misma manera, el intervalo de 22-21,9 es concordante con la edad ca. 22,1 Ma obtenido para la Ignimbrita Molinos, que a su vez es concordante con una de las edades K-Ar de García *et al.* (2004) (Figura 1). Por lo tanto, se propone el intervalo de edad de 24,8-23,7 Ma para la Ignimbrita Poconchile, concordante con edades Ar/Ar de García *et al.* (2004) en tobas en la Formación Azapa.

Las edades propuestas resultan parcialmente consistentes con los resultados de polaridad magnética (Figura 2), en parte reportados por Tapia (2003). Las edades obtenidas de la Ignimbrita Poconchile, que presenta una dirección de polaridad magnética normal, se correlaciona a los cronos de polaridad C8n2n, C8n1n, C7An, C7n2n y C7n1n, lo que restringe su edad a $24,83 \pm 0,77$ Ma; la edad obtenida de la Ignimbrita Cardones, interpretada como de polaridad inversa, se correlaciona a los cronos C6Cr y C6Cn2r, acotando su edad a $23,22 \pm 0,18$ Ma; la Ignimbrita Molinos, que presenta polaridad magnética inversa, permite acotar su edad a $22,01 \pm 0,03$ Ma, al correlacionarse con el cron C6Bnr; las edades obtenidas en la Ignimbrita Oxaya son correlacionadas con el segmento inferior del cron C6n por presentar polaridad normal, limitándola a $19,37 \pm 0,17$ Ma; la Ignimbrita Sucuna, que resultó tener polaridad inversa, acota los resultados de edades al cron C5Er, resultando una edad de $18,57 \pm 0,07$; y finalmente los resultados de edad de la Ignimbrita Aico, cuya polaridad magnética aún no ha sido determinada, se infiere temporalmente equivalente a la Ignimbrita Sucuna, por su ubicación estratigráfica.

Implicancias

La ocurrencia de 6 eventos volcánicos explosivos de gran volumen durante el Oligo-Mioceno Inferior interrumpieron la erosión y deposición de enormes depósitos aluviales y fluviales de gran energía, que están representados por la Formación Azapa y que se extienden hasta la Formación El Diablo. El mediano grado de soldamiento de las ignimbritas permitió su rápida incisión, sin alteraciones mayores del sistema de drenaje que dio origen a las formaciones Azapa y El Diablo.

La ausencia de la ignimbrita Molinos en la Quebrada Lluta podría explicarse por el corto tiempo transcurrido desde el emplazamiento de la ignimbrita Cardones, lo que habría impedido su incisión y la generación de un valle que pudiera canalizar a la ignimbrita Molinos en dicho sector.

Un estudio detallado de la distribución de facies, en colaboración con los países vecinos, podría permitir la localización de la(s) caldera(s) que dio(dieron) origen a las ignimbritas del Oligo-Mioceno.

Palabras Clave: ignimbritas, volcanismo explosivo, Altiplano.

Agradecimientos: Esta es una contribución que cuenta con el patrocinio de la Subdirección Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Referencias:

- Arcos R., Naranjo J.A., Ladino M., Polanco E. 2018. Carta Putre. Región de Arica y Parinacota. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 197, Servicio Nacional de Geología y Minería, 59 p.
- Charrier R., Fariás M., Maksaev V. 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(1):5-35.
- de Silva S., Kay S. 2018. Turning up the Heat: High-Flux Magmatism in the Central Andes. Elements 14(4): 245-250.
- Dickinson A.P. 2005. Radiogenic Isotope Geology: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 510 p.
- García M., Gardeweg M., Clavero J., Hérail G. 2004. Hoja Arica, Región de Tarapacá. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 84, Servicio Nacional de Geología y Minería, 150 p.
- Montecinos F. 1963. Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 109 p.
- van Zalingue M., Sparks R., Cooper F., Condon D. 2016. Early Miocene large-volume ignimbrites of the Oxaya Formation, Central Andes. Journal of the Geological Society, London 173:716–733.
- van Zalingue M.E., Sparks R.S.J., Blundy J.D. 2017. Petrogenesis of the Large-volume Cardones Ignimbrite, Chile; Development and Destabilization of a Complex Magma–Mush System. Journal of Petrology 58(10):1975–2006.
- Wörner G., Belousova E., Turner S., Keeman J., Schmitt A. K., Gerdes, A. de Silva, S. 2020. Ignimbrite flare-ups in the Central Andes: crustal sources and processes of magma generation. Abstract from EGU General Assembly 2020.

Origen del volcanismo rejuvenecido en Juan Fernández: pluma del manto con influencia de litósfera metasomatizada

Javier Reyes¹, Vanessa Gutiérrez¹, Carlos Orellana¹, Luis E. Lara²⁻³, Folkmar Hauff⁴, Kaj Hoernle⁴⁻⁵

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias

(3) CKELAR Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico

(4) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

(5) Kiel University, Institute of Geosciences

La dorsal de Juan Fernández (JF) es una cadena volcánica de intraplaca emplazada sobre la placa de Nazca que fue formada gracias a la fusión parcial de una pluma del manto con baja temperatura y leves heterogeneidades composicionales. El paso de la litosfera oceánica sobre la pluma se refleja en la formación de varios volcanes de escudo constituidos por basaltos transicionales con signatura isotópica cercana a FOZO. Tras un periodo de inactividad magmática y fuerte erosión, algunos de los conjuntos volcánicos parcialmente desmantelados, desarrollan una etapa de volcanismo tardío conocida en el contexto de intraplaca como volcanismo rejuvenecido, cuyo origen a nivel global (en casos como Hawaii, Canarias y Samoa) se atribuye principalmente a fusión de una pluma del manto o de litosfera metasomatizada.

Pese a las diferencias de edad y ubicación geográfica, los magmas emitidos en la etapa rejuvenecida muestran grandes similitudes composicionales entre sí, que apuntan hacia procesos petrogénéticos comunes y reiterados en el tiempo, y consisten en basanitas y picrobasaltos con olivino, diópsido y ocasionales xenolitos ultramáficos y máficos. Están enriquecidos en elementos incompatibles, especialmente en LILE y LREE respecto a la etapa de desarrollo del escudo, con una evolución magmática controlada por la cristalización fraccionada y asimilación de litósfera (de composición ultramáfica y/o similar a MORB). Su isotopía es similar al volcanismo de escudo, cercana a FOZO, aunque sutilmente empobrecida (valores más bajos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y más altos de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$). Destaca la excepción del $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, con valores más radiogénicos que el escudo, que se constituyen como los más altos reportados para la placa de Nazca (solo parcialmente comparables con las islas San Félix y San Ambrosio). Además, la variación interna de las razones isotópicas es subparalela a la tendencia EM1-HIMU y no a la mezcla representativa de litosfera metasomatizada (entre DM y el escudo JF). Estas características isotópicas favorecen un origen para el volcanismo rejuvenecido en JF a partir de la fusión de una pluma del manto heterogénea, que muestra componentes del manto de manera sutilmente diferente a la etapa de escudo.

Palabras Clave: Juan Fernández, pluma del manto, litósfera metasomatizada, OIB, volcanismo intraplaca.

Financiamiento Está investigación está financiada por el proyecto Fondecyt Iniciación 11200942 (PI Reyes) y Fondecyt 1110966 y 1141303 (PI Lara).

Agradecimientos: Los autores agradecen a CONAF por el permiso de investigación en área protegida y el apoyo logístico en terreno.

Volatile content and petrogeochemical evidence of incomplete bimodal magma mixing at Sollipulli volcano, Southern Volcanic Zone

Philippe Robidoux¹, Yves Moussallam², Estelle Rose-Koga³, Pablo Alfaro-Sánchez⁴, Daniele Tardani⁵, Glyn Williams-Jones⁶, Pamela Pérez-López⁷, Joaquín Morales⁸

(1) Universidad de Chile, Department of Geology, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Región Metropolitana, Chile

(2) Columbia University, Lamont-Doherty Earth Observatory, New York, USA

(3) U. Orléans Cedex 2, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, 1A Rue de la Férollerie, Orléans Cedex 2, France, Orléans, France

(4) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Valdivia, Chile

(5) University of O'Higgins, Institute of Engineering Sciences, Rancagua, Chile

(6) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Burnaby, Canada

(7) Consultoría e Investigación Geológico Ambiental Ltda, Huasco, Chile

(8) Universidad del Desarrollo, Ingeniería, Santiago, Región Metropolitana, Chile

Introduction

Sollipulli (1,407 m.a.s.l.) is a stratovolcano from the South Volcanic Zone, Chile (33° S - 46° S). It presents a caldera-shaped structure with a Holocene eruptive record and hosts active geothermal systems, for example at Alpehue Termas [1]. Through sampling of volcanic pyroclastic material, our objective is to characterize the magmatic intrusive system that potentially heat and produce magmatic fluids in the western sector of Sollipulli to improve knowledge on volcanic hazard and geothermal exploration.

Methodology

Magma reservoir depth location and magma volatile compositions are investigated for Ignimbrite Alpehue 2.900 yrs A.P. produced by Crater Alpehue [2,3]. Crystals were selected from the pumice deposits of the mixed Alpehue Ignimbrite. The geochemistry of melt inclusions (MI) trapped in olivine and pyroxene crystals separated from rocks are measured for major (by EMPA) and volatile elements (H₂O, CO₂, S, Cl, F; by SIMS). Integrating melt volatile and compositional data together with mineral compositions in geothermobarometers we estimated the minimum pressure (depth) of magma storage/crystallization.

Results

The vesicular scoria clast does not show reaction rims but are deformed and incorporated in the ignimbrite pumice with a elongated shaped and highly vesicular groundmass matrix. Melt inclusions in plagioclase and augite crystals have andesitic-dacitic compositions according to preliminary EMPA results. SIMS analysis of augite-hosted melt inclusions in both type of fragments shows dissolved H₂O and CO₂ concentrations between ~0.1 and 1.78 wt.% and 29 to 272 ppm, respectively. The results show low sulfur (~36–51 ppm), high chlorine (1334–2583 ppm) and a large range of fluorine concentrations from 71–884 ppm. Melt inclusions hosted in crystals from the scoria and pumice phases show indistinguishable compositions (dacitic pumice melts; 67–74 wt. % SiO₂; 3.6–4.7 K₂O wt.%). Few plagioclase-hosted MI in scoria had <71 SiO₂ and 4.0 K₂O (in wt.%). The volatile solubility models [5] indicate that melts were trapped in plagioclases from scoria at 0.2–1.1 kbar, at temperature ~935±1°C and oxidizing conditions of 4.0 NNO⁴. In augite from pumice (941–1207°C) similar equilibrium pressures are met (0.2–1.1 kbar). The Augite-liquid geothermobarometers [6] used on the pumice indicate that pressure and temperature ranges are 2.8–7.0 kbar and 942–1096°C (eq. 32c-d in Putirka, 2008). The Pgl-L pairs is also measured (eq. 25a-26 in Putirka, 2008), with pressure and temperature range estimates respectively of 23.8–23.9 kbar and 914–943°C, corresponding to oxidizing conditions of 2.1–3.4 NNO⁶ (no equilibrium in mafic scoria).

Conclusion

The mixing is not homogenized between incorporated scoria and pumice fragments according to clast/matrix textures. Contrary to Mineral-Liquid pairs from pumice fragments (Pgl or Cpx), equilibrium KD_{Mg-Fe} is not reached in between phenocrysts and residual liquids from scoria fragments. According to literature, mafic magmas identified with bulk rock analyzes on scoria demonstrated that a small proportion of the Alpehue event erupted volcanic material with mafic compositions [3], but here new evidence shows that pumice as scoria pyroclasts share similar dacitic melt compositions and part of the thermal story (<940°C). The large range of mineral equilibrium as solubility P-T conditions represent deep <70 km reservoir evolutions reached first by anorthite plagioclase (down to 6.0 km to minimum volatile saturation) [5]. Augites crystallize at least for <4.1 km depth to saturate volatiles [5], but at 1.7–3.4 km to conserve equilibrium with melts [4]. The H₂O concentrations were estimated from MI-hosted plagioclases in two sets of mafic scoria phenocrysts (An_{70–77} and An_{31–37}) using model of Lange et al. (2009) [7] and range from 1.41 to 2.53 wt.% which englobe our maximum water content in MI dataset (1.78 wt.%). The range of CO₂-S-F volatile contents indicate that melts are mostly degassed at <3.9 km as testified in all samples (scoria or pumice phenocrysts), but chlorine enrichments is observed with SiO₂ (wt.%), probably enhanced due to its affinity to the felsic melts [8], while fluorine moderate content require further studies to explain its variation with melt composition.

Keywords: Melt inclusions, Sollipulli, Magma mixing, Melt volatiles, Geothermic.

Financing: This work is part of ANID, Fondecyt Iniciación No 11190846 project of Philippe Robidoux (2019-2022), Fondecyt Iniciación No 11220777 project of Daniele Tardani and Fondap No ACE210005, Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) managed by Diego Morata.

Acknowledgments: Thanks to Dra. Manuela Nazzari, Dir. Piergiorgio Scarlato (INGV-Roma)/Aaron Sanchez (U. Mayor), Sebastian Gatica (U. Chile), Javier Manosalva (U. Austral), Nordine Bouden and Johan Villeneuve (CRPG-Nancy).

Geotermobarometría de los Basaltos de la Formación Chile Alemania

Jorge Marín¹, Iván Soto¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Los basaltos pertenecientes a la Formación Chile Alemania afloran en el límite actual entre la depresión central y la precordillera en la región de Antofagasta y fueron depositados durante Paleoceno-Eoceno [1]. Los basaltos analizados son de composición básicas (47-48% SiO₂), con una afinidad alcalina (Na₂O+K₂O=6%), con fenocristales de olivino, clinopiroxeno (diópsido) y plagioclasas; y una masa fundamental compuesta por plagioclasas, clinopiroxenos, vidrio y minerales opacos. Las texturas presentes son cúmulos formados por olivinos [2]. La mineralogía, petrografía y geoquímica indican que son basaltos alcalinos, tipo Traquibasaltos de acuerdo con el diagrama TAS [3] con una firma geoquímica de OIB, debido al alto porcentaje de titanio (1,9% de TiO₂). Los análisis puntuales en SEM, realizados a 6 cristales de olivino y a 6 cristales de clinopiroxenos, se modelaron según Putirka [4] y para determinar la profundidad se utilizó la transformación de Tulloch y Challis [5]. Los resultados tuvieron una constante de equilibrio KD cercano a 0.27, coherentes para condiciones de equilibrio. Las composiciones químicas de cristales de olivinos están muy cercanos a la curva de estabilidad en el diagrama de Rhodes [6]. Los resultados permiten interpretar que existen dos profundidades de formación de los piroxenos, una profundidad máxima de 78,33 km y temperaturas aproximadas de 1.280°C a 1.300°C, y una segunda generación de cristales con profundidades en torno a los 50 km y temperaturas de 1.215°C aproximadamente. Los olivinos a su vez presentan temperaturas de formación de 1.212°C a 1.246°C por lo que es probable que se hayan formado en condiciones similares a los piroxenos [2]. Considerando que el moho se encontraba a una profundidad entre los 35 y 37 km (7) durante el Cretácico superior y el Eoceno, lo que permite interpretar que los basaltos se originaron por la fusión parcial de un manto enriquecido, a una profundidad de 50 km y temperaturas en torno a los 1.210°C. Posteriormente los magmas ascendieron rápidamente a través de la corteza, sin alcanzar a diferenciarse, entraparse ni contaminarse, extruyendo en una cuenca de tras arco.

Palabras Clave: Formación Chile-Alemania, Barometría, Basaltos.

Agradecimientos: Se agradece a la Unidad de Equipamiento Científico MAINI, de la Universidad Católica del Norte por su apoyo en la realización de análisis puntuales.

Referencias:

- [1] Astudillo, N., Ferrando, R., Montecino, D., Espinoza, G., Venegas, B., Matthews, S., Cornejo, P., Arévalo, C. (2017). Carta Augusta Victoria, Región de Antofagasta, Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 189: 97 p., 1 mapa escala 1:100.000.2.
- [2] Marín, J. (2023). Caracterización Petrográfica, Geoquímica y Geotermobarométrica de los Basaltos en Sector Augusta Victoria, Región de Antofagasta, Chile. Tesina para optar al título de Geólogo, Carrera de Geología, Universidad Católica del Norte. Inédito.
- [3] Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A.; Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- [4] Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems, v. 69, no. 1, p. 61-120.
- [5] Tulloch, A., Challis. (2000). Emplacement depths of Paleozoic-Mesozoic plutons from western New Zealand estimated by hornblende-Al geobarometry, *Geophysics*, v. 43, no. 4, p. 555-567.
- [6] Rhodes JM, Dungan MA, Blanchard DP, Long PE (1979) Magma mixing at midocean ridges: evidence from basalts drilled near 22° N on the mid-Atlantic ridge. *Tectonophysics* 55:35-61.
- [7] Haschke, M., Günther, A., Melnick, D., Echtler, H., Reutter, K.-J., Scheuber, E., and Oncken, O. (2006). Central and Southern Andean Tectonic Evolution Inferred from Arc Magmatism.

Evolución magmática de los volcanes Sucuna (18°83'S y 69°83'O) y Márquez (18°71'S y 69°45'O), región de Arica y Parinacota, Andes Centrales del norte de Chile

Catalina Vargas Valdés¹, Edmundo Polanco Valenzuela²

(1) Universidad Andrés Bello, Escuela de geología, Facultad de Ingeniería, Campus República, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de geología general, Volcanología, Santiago, Chile

Nuevos antecedentes respecto al volcanismo Mioceno en el Altiplano del norte de Chile fueron obtenidos bajo el marco del levantamiento geológico de la Carta Codpa (Arcos *et al.*, en elaboración) llevado a cabo por el Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). Bajo este contexto, nueva información respecto a dos centros eruptivos inactivos, correspondientes a los volcanes Sucuna y Márquez permitieron llevar a cabo esta investigación.

Los volcanes Sucuna y Márquez se encuentran ubicados en el borde occidental de la Alta Cordillera en el extremo norte de Chile, siendo el volcán Sucuna (ca. 4.410 m) aquel con mayor antigüedad, datado entre 15,0±0,6 y 11,6±0,4 Ma (K-Ar en roca, García *et al.*, 2004) y el volcán Márquez (ca. 4.620 m) con edades de entre 11,2±0,6 y 9,3±0,4 Ma (K-Ar en roca total y biotita, respectivamente; García *et al.*, 2004), siendo correlacionables temporal y composicionalmente las rocas más jóvenes del volcán Sucuna con las más antiguas del volcán Márquez.

El volcán Sucuna es un estratovolcán inactivo de composición andesita basáltica a andesítica bien preservado, con la particularidad de poseer en su centro una morfología circular y cóncava, similar a la de una circa glaciar de 8 km de diámetro. Desde el Mioceno medio al Mioceno superior temprano su actividad ha sido efusiva representada por la formación de coladas de lava de composición andesítica y traquiandesítica (subunidades Sucuna 1 y Sucuna 2) con valores desde 57 a 62% en peso de SiO₂ con una afinidad calcoalcalina de medio a alto potasio (1,5-3,3% en peso de K₂O). Por otro lado, el volcán Márquez corresponde a un estratovolcán inactivo con una morfología elongada en dirección NO-SE a 870 m de altura sobre su base, caracterizado por una actividad efusiva desde el Mioceno superior temprano a tardío, representada por dos grandes secuencias de coladas de lavas clasificadas como traquiandesitas y dacitas con valores desde 58 a 64% en peso de SiO₂ (subunidades Márquez 1 y Márquez 2) con una afinidad calcoalcalina con contenido Alto de K (2,4-3,9% peso de K₂O).

Los patrones de elementos mayores de ambos volcanes comparten casi en su totalidad similitudes, lo cual permite afirmar que ambos centros eruptivos tienen una génesis en común asociada a un arco volcánico continental calcoalcalino, siendo uno de los principales procesos involucrados en su evolución la cristalización fraccionada, con tendencias decrecientes en el contenido de los óxidos de Fe, Ca, Mg, Al, que indican la incorporación de estos elementos en las distintas fases minerales presentes en estas rocas. Los patrones decrecientes desde las tierras raras ligeras hasta las tierras raras pesadas para ambos volcanes, presentan anomalías positivas en Sr, Rb y Ba, lo cual permite caracterizarlos como magmas calcoalcalinos orogénicos. De igual manera, anomalías negativas de Nb y Ti sugieren características químicas similares a la corteza, o bien a procesos de contaminación cortical. Los diagramas de elementos incompatibles son interpretados como magmas con influencia cortical de un margen convergente en subducción, con altas concentraciones en elementos móviles, debido a la posible incorporación de fluidos durante la fusión parcial del manto dando origen a estas rocas de composición intermedia.

Por lo tanto, es posible establecer cronológicamente el comienzo de la actividad volcánica asociada al volcán Sucuna desde el Mioceno medio temprano a tardío (15-12,9 Ma) con el desarrollo de las subunidades Sucuna 1 y 2, siendo esta última coetánea a la actividad temprana del volcán Márquez (subunidad Márquez 1). Posteriormente, ocurrió una migración del volcanismo hacia el norte, quedando en actividad solo el volcán Márquez (Subunidad Márquez 2) hasta el Mioceno superior temprano (11-9,2 Ma), dando fin al período de actividad volcánica, convirtiéndose en remanentes volcánicos situados actualmente en el límite occidental del arco volcánico del extremo norte de Chile.

Palabras Clave: Volcanismo Mioceno, Volcán Sucuna, Volcán Márquez, Altiplano Chileno.

Referencias:

- Arcos, R.; Polanco, E.; Hevia, F.; González, E. y Franco, C. (en elaboración). Carta Codpa, Región de Arica y Parinacota. Escala 1:100000. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Arcos, R.; Naranjo, J.; Ladino, M.; Polanco, E. (2018). Carta Putre, Región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 197: 141.
- García, M.; Gardeweg, M.; Clavero, J.; Hérial, G. (2004). Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 84: 150.

Nuevas estimaciones de parámetros magmáticos intensivos en productos eruptivos del Grupo Volcánico Descabezados, Zona Volcánica Sur Transicional

Franco Vera¹, Jorge Romero¹⁻², Constanza Perales¹, Álvaro Amigo¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

El estudio de los procesos y las condiciones de almacenamiento y ascenso magmático es fundamental para establecer los factores que desencadenan las erupciones volcánicas, así como la dinámica de estas últimas. Este conocimiento resulta crítico en la evaluación de los peligros volcánicos y el monitoreo de las señales geofísicas precursoras a una erupción. El Grupo Volcánico Descabezados (GVD) corresponde a una agrupación de al menos 18 centros de emisión postglaciales localizados en la cordillera de la región del Maule (35°14'-35°49' S; 71°11'-70°35' O) que cubren una superficie aproximada de 450 km² (Vera *et al.*, 2022). Este grupo incluye a los estratovolcanes principales (Descabezado Grande, Quizapu y Cerro Azul), además de una serie de centros eruptivos menores (CEM), algunos de estos máficos (Las Resolanas, Los Hornitos, Cerro Colorado, Reformados y Manantial Pelado) y otros silíceos (Mondaca y Alto Las Mulas). La actividad eruptiva histórica prominente (p. ej. volcán Quizapu entre 1846 y 1960) sumada al registro eruptivo Holoceno reciente (p. ej. Hornitos, Mondaca y Las Resolanas), y a la amplia diversidad composicional de los productos volcánicos, son ideales para estudiar los procesos magmáticos y condiciones de almacenamiento del GVD. En este trabajo se utiliza una nueva metodología para la estimación de condiciones magmáticas intensivas (temperatura, presión y contenido de H₂O), a partir de composiciones de roca total y paragénesis minerales en productos que no muestran evidencias de mezcla de magmas (Weber & Blundy, 2023), con el objetivo de realizar una caracterización de primer orden del sistema magmático del GVD. Se seleccionaron 72 análisis químicos realizados en el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), de los cuales 36 entregaron resultados válidos (½?) respecto al modelo utilizado. Los resultados revelan similitudes genéticas para los productos máficos (50-58% SiO₂) de los volcanes Manantial Pelado, Descabezado Grande, Cerro Azul y CEM máficos, los cuales se cristalizaron a presiones de 3-4 kbar y temperaturas de 1.060±20 °C con altos contenidos de agua (3-5%). Dicha fuente es coherente con los procesos más profundos estimados en base a pares mineral-líquido en equilibrio para el volcán Quizapú, cuyo reservorio más somero se localiza a 1,1 kbar y 865 °C (Higgins *et al.*, 2015). En cuanto a los productos silíceos de los volcanes Mondaca y Alto Las Mulas, se estimó condiciones de 3 kbar y ca. 880 °C, con contenidos de agua más elevados (5-6%). En función de los datos, se interpreta la existencia de múltiples zonas de almacenamiento magmático, a profundidades de 12-14 km y ca. 4 km, en las cuales se desarrollan procesos de cristalización fraccionada y, ocasionalmente, mezcla de magmas que derivan en erupciones. Estos antecedentes se complementarán con geotermometría y geobarometría a partir de análisis petrológicos, que permitirán constreñir aún más las propiedades que caracterizan al sistema magmático transcortical del GVD. Además, los resultados mejorarán la comprensión del almacenamiento y evolución del magma en la Zona Volcánica sur Transicional de los Andes, caracterizada por una corteza engrosada (35-45 km de espesor) y menor productividad magmática en comparación al segmento del arco hacia el sur.

Palabras Clave: Andes del Sur, Maule, Petrología, Geoquímica, Sistema magmático.

Referencias:

- Higgins, M.D.; Voos, S.; Vander Auwera, J. 2015. Magmatic processes under Quizapu volcano, Chile, identified from geochemical and textural studies. Contributions to Mineralogy and Petrology 170. doi: <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1209-5>.
- Vera, F.; Jorquera, C.; Amigo, Á.; Bertin, L. 2022. Peligros de los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul, Quizapu y centros eruptivos menores, región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 39: 99 p., 1 mapa escala 1:75.000. Santiago.
- Weber, G., & Blundy, J. 2023. A machine learning-based thermometer, barometer and hygrometer for magmatic liquids. <https://doi.org/10.31223/X5NW9P>

Paleozoic crustal and Triassic rift evolution of the proto-Andes from detrital heavy minerals

Heinrich Bahlburg¹, Fernando Panca¹

(1) Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie, Corrensstrasse 24, Münster, 48149

The central proto-Andean margin of South America evolved as an external accretionary orogen since the Late Neoproterozoic. During the Paleozoic and Triassic, the evolution of the margin and its orogenic basins was linked to alternating states of extension and shortening. The most prominent arc system is the Late Cambrian-Ordovician Famatinian arc which extended along the entire margin. The Silurian and Devonian is here a time of tectonic, magmatic, and metamorphic quiescence allowing for the steady accumulation of shallow marine facies on a stable platform west of the Ordovician orogen. This setting was most likely connected to a lull phase of arc activity.

From the Late Carboniferous to the Triassic, the Gondwanide Orogeny presents a highly variable record along the central proto-Andean margin. An arc system with episodic activity was present in northern Chile and absent from Bolivia. In Peru the setting has been considered enigmatic with interpretations varying between backarc basin and continental rift.

We demonstrate through a study of the late Permian and Triassic Mitu Group which is exposed for 1,500 km in NW-SE orientation along the length of Peru that the Mitu basin formed as a backarc basin. This interpretation is compelled by the existence of eastward dipping subduction zones, and respective movements of the oceanic plate system, south and north of the Mitu basin, in Chile and the northern Andes, respectively.

The Mitu Group is characterized by highly variable alluvial and aeolian facies with angular unconformities at base and top of the group. It appears to be arranged in several subbasins. Mafic alkaline and calc-alkaline lavas, predominantly of within-plate OIB affinity, and felsic ignimbrites are intercalated episodically. U-Pb zircon ages of the latter allow for a chronostratigraphic subdivision of the subbasin fills.

Detrital zircon age distributions of Paleozoic central Andean strata are the product of extensive recycling. At best, they qualitatively reflect a typical South American, i.e. Amazonian, provenance with ages ranging from the Archean to the maximum ages of deposition. In the Mitu Group, maximum depositional ages indicate a variable onset of deposition between 260 and 216 Ma, locally continuing into the Jurassic. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ isotope values of late Permian and Triassic zircons form vertical arrays between ca. -10 and +6 and indicate a significantly more pronounced juvenile component in Mitu rocks than in the older arc rocks.

This conforms to the widely held view that accretionary orogens are the sites of the production of juvenile continental crust. The proto-Andean Famatinian and Late Carboniferous to Early Permian magmatic arcs, however, are characterized by a marked scarcity of mafic intrusive and extrusive rocks. The detrital heavy mineral spectra reflect this with Nb/Cr ratios in detrital rutiles, for example, indicating predominant input from felsic rocks. Detrital zircon U-Pb age distributions denote the arcs as prolific zircon sources. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ isotope values of the zircons derived from the arcs, and the Famatinian arc in particular, are strongly negative. In both cases a pronounced recycling of older continental crust is indicated. Detrital zircons of Devonian age are very scarce.

Keywords: sedimentology, provenance research, Mitu Group, Permian-Triassic, Peru.

Financing: We acknowledge funding through grant BA1011/45-1 of the German Research Foundation to HB.

The Chon Aike magmatic province: an active margin origin?

Joaquín Bastías¹⁻², Richard Spikings³, Teal Riley⁴

(1) Trinity College Dublin, Department of Geology, Dublin, Irlanda

(2) Universidad Santo Tomás, Carrera de Geología, Santiago, Chile

(3) University of Geneva, Department of Earth Sciences, Geneva, Switzerland

(4) British Antarctic Survey, Cambridge, England

Introduction

A combination of the geochemical and isotopic compositions of the Jurassic igneous rocks exposed along the Antarctic Peninsula and Patagonia suggest that they all formed in a continental arc setting without a significant input of a mantle plume, as presented in Bastías et al. (2021). This interpretation modifies previous interpretations (e.g. Pankhurst et al., 2000; Riley et al., 2001) that suggested the early deposits of the Chon Aike magmatic province in eastern and central Patagonia formed by the coupled action of an active margin and the peripheral thermal effect of the Karoo mantle plume. We present herein a tectono-magmatic evolution for the Chon Aike magmatic province following the argument of Bastías et al. (2021).

Furthermore, they argue that a supra-subduction zone origin is supported by: (i) enriched LILE and LREE, with negative Nb, Ta, Sr and Ti anomalies in all of the Jurassic igneous rocks, which are typical of slab-dehydration reactions and thus active margins, (ii) the trace element compositions of Jurassic igneous rocks in Patagonia and the Antarctic Peninsula are indistinguishable throughout the region, and thus it is likely that they evolved via the same magmatic processes, and (iii) the whole rock Nd and Sr, and zircon Hf isotopic compositions of Late Triassic-Jurassic igneous rocks show that the magmas formed from mixed sources that resided within the continental crust. Therefore, unlike the igneous units of the Karoo and Ferrar LIPs, the involvement of a mantle plume is not necessary to generate any of the chronological, geochemical or isotopic characteristics of the Chon Aike magmatic province. Here we present a revised geological evolution for the Late Triassic-Jurassic in Patagonia and the Antarctic Peninsula.

V0 episode: ~223-200 Ma

Active margin magmatism commenced as early as ~223 Ma, forming the Rymill Granite Complex in the Antarctic Peninsula (Bastías et al., 2020; Riley et al., 2020) and Late Triassic magmatism in the Deseado Massif in eastern Patagonia (Navarrete et al., 2019). The location of the Deseado Massif within eastern Patagonia would have been at least ~1,100-1,000 km distant from the palaeotrench, suggesting these magmas formed above a low angle slab (the South Gondwanian flat-slab of Navarrete et al., 2019). The presence of a flattened slab is supported by a Late Triassic-Early Jurassic contractional metamorphic phase that is recorded in the southwestern Patagonian fore-arc (Chonide Orogeny, e.g. Thomson & Hervé, 2002). However, Late Triassic arc plutons are exposed along the Antarctic Peninsula (Rymill Granite Complex), proximal to the palaeotrench, implying that any flattened slab must have been spatially restricted to present-day southern Patagonia and the northern Antarctic Peninsula. Interestingly, this is consistent with several paleogeographic reconstructions that juxtapose the northern Antarctic Peninsula and southern Patagonia during the Late Triassic-Middle Jurassic (e.g. König & Jokat, 2006).

Magmatic quiescence: ~200-188 Ma

Magmatism is not recorded within Patagonia or the Antarctic Peninsula during the interval ~200-188 Ma. Coeval magmatic quiescence has been proposed for central Chile and the Neuquen Basin in Argentina, revealing a paucity or lack of magmatism along a potential trench parallel distance of ~5000 km. Some studies equate this magmatic gap with a lack of active subduction to the south of ~18°S within South America during the Early Jurassic (e.g. Mpodozis & Ramos, 2008).

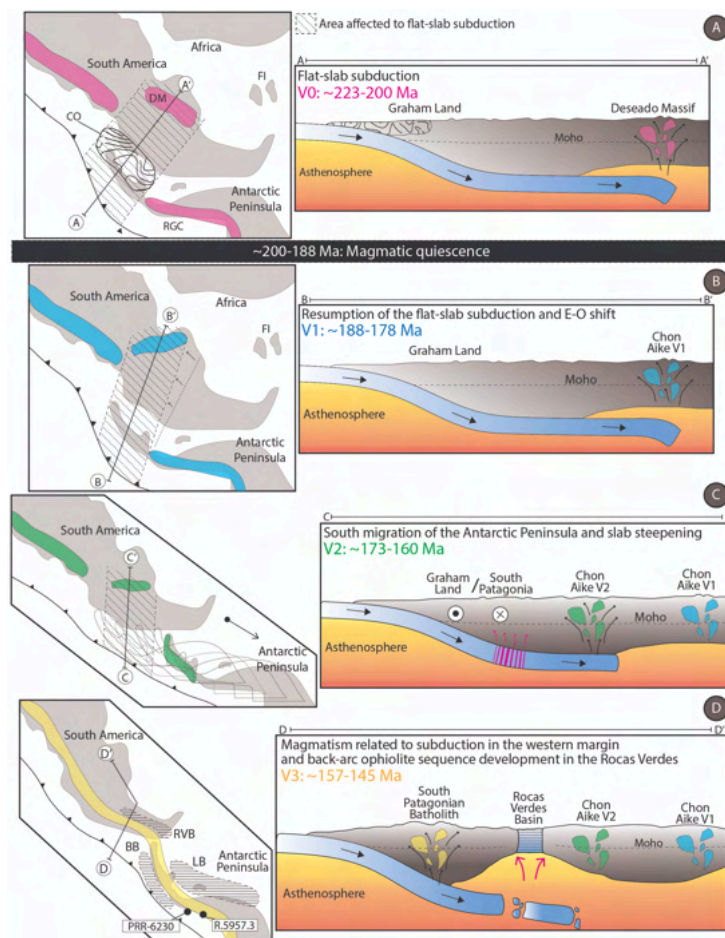
V1 episode: ~188-178 Ma

Arc-related magmatism resumed at ~188 Ma along the western margin of northern Patagonia, the southern Antarctic Peninsula and in eastern Patagonia. The igneous rocks in eastern Patagonia have been grouped into the V1 Chon Aike episode (e.g. Pankhurst et al., 2000), and were interpreted by Riley et al. (2001) as melts of subduction-modified lower crust, where melting was triggered by extension associated with the break-up of Gondwana, with peripheral heating from the Karoo mantle plume (Riley et al., 2001). However, the compiled data presented in Bastías et al. (2021) do not require the existence of heat derived from a mantle plume, and the simplest explanation of the geochemical and isotopic compositions data, combined with geographic distribution, is that these magmas formed above a flattened-slab, implying a resumption of flat-slab subduction, which would be consistent with their geochemical and isotopic compositions and geographic location. The whole rock Nd-Sr and zircon Hf isotopic compositions of the rocks that formed during the V1 episode reveal a dominance of crustal sources, partially corroborating the model of Riley et al. (2001). The V1-aged flat-slab may have either been a reactivated section of the Triassic flat-slab, or it may correspond to younger and buoyant oceanic lithosphere that was subducted beneath Gondwana towards the end of magmatic quiescence between ~200-188 Ma. Nevertheless, the nature of the subducted oceanic lithosphere that resumed the subduction during the V1 episode remains unknown.

V2 episode: ~173-160 Ma

The V2 magmatic episode occurred during the interval ~173-160 Ma, and is exposed along the western margin of southern Patagonia, the Deseado Massif in eastern Patagonia and the northeastern Antarctic Peninsula. The period was temporally separated from the older V1 episode (~188-178 Ma) by an apparent magmatic gap during ~178-173 Ma, although a few zircon grains yield ²⁰⁶Pb-²³⁸U concordia ages that span this gap. The magmas produced during the V2 episode yield trace element compositions that are similar to those that formed during the V0 and V1 episodes, suggesting a continuation of active margin magmatism.

The whole rock Sr-Nd isotopic compositions of the V2 episode yield a smaller range than during V1, although they are not significantly different to the rocks that formed during the Late Triassic (episode V0). The presence of coeval arc magmas in the northern Antarctic Peninsula and eastern Patagonia implies a continuation of apparently persistent flat-slab subduction during ~173-160 Ma in Patagonia. The V2 episode within Patagonia is exposed to the southwest of the V1 rocks (~188-178 Ma), although they are both attributed to flat-slab magmatism. We consider this to be a result of modification of the slab architecture, perhaps via either slab failure or slab steepening. This complements previous authors (e.g. Riley et al., 2001; Bryan et al., 2002) suggesting that the migration of the volcanism was partially generated by the action of the active margin. The presence of V2-aged arc magmas in the northern Antarctic Peninsula (~173-160 Ma), which were coeval with those in eastern Patagonia (Deseado Massif), suggests that the Antarctic Peninsula may have migrated south relative to Patagonia during ~180–170 Ma, which is consistent with several reconstructions (e.g. Grunow, 1993; Lawver et al., 1998). A lack of evidence for rifting between Patagonia and the Antarctic Peninsula during the V2 time (~173-160 Ma) suggests that this transcurrent sinistral displacement did not significantly extend the crust. Sinistral displacement during the Middle or Late Jurassic was also suggested by Hervé et al. (2006), to account for similarities and differences in the Mesozoic sedimentary rocks of western Patagonia and the northern Antarctic.



Schematic paleo-reconstruction of southwestern Gondwana for the Late Triassic-Jurassic. (A) V0: ~223-200 Ma, initiation of flat-slab subduction in the Deseado Massif (DM), along with metamorphism associated with the Chonide Orogeny (CO). (B) V1: ~189-178 Ma, following magmatic quiescence during ~200-188 Ma, the active margin resumed forming arc rocks in the southern Antarctic Peninsula and in Patagonia. (C) V2: ~173-160 Ma, migration of the arc axis towards the north of the Antarctic Peninsula, and trenchward within Patagonia. The Antarctic Peninsula drifted southward with respect to Patagonia. (D) V3: ~157-145 Ma, emplacement of the arc along the west margin. Back-arc extension in the Rocas Verdes Basin (RVB; Calderon et al., 2007). Coeval deep-marine sedimentary rocks were deposited in the fore-arc and back-arc of the Antarctic Peninsula, which corresponds to the Byers Basin (BB; Bastias et al., 2019) and the Larsen Basin (LB; Hathway, 2000), respectively.

V3 episode: ~157-145 Ma

Magmatism during the V3 episode is recorded along the western margin of Patagonia and the Antarctic Peninsula. Previous authors interpreted this period as a transition from mantle-plume related to active margin magmatism (e.g. Pankhurst et al., 2000). Most of the rocks that formed during the V3 episode in Patagonia are located within the South Patagonian Batholith (Hervé et al., 2007), and minor exposures are found in central Patagonia. With a few exemptions in the southern Antarctic Peninsula, V3-aged magmatism is mostly constrained to the north of the Antarctic Peninsula and has a similar geographic distribution to rocks of the V2 episode. Whole rock geochemistry and isotopic tracing presented in Bastias et al. (2021) suggest that these magmas formed above an active margin, and thus it is likely they formed above the same subducted slab that gave rise to the older Jurassic and Triassic igneous rocks Pankhurst et al., 2000). Importantly, there are no clear geochemical differences between the V3-aged, and older Jurassic and Triassic igneous rocks.

Whole rock (Sr-Nd) and zircon (Hf) isotopic data from four rocks suggest that the source regions for V3 magmatism were similar, or perhaps the same as those for the earlier V0-V2 periods (~223-160 Ma), albeit with a higher proportion of a juvenile component (Bastias et al., 2021). Furthermore, these authors proposed that these rocks were located at the boundaries of the postulated flat-slab, and thus they could have been influenced by asthenospheric upwelling through a slab window, inducing greater amounts of melting of isotopically juvenile mantle rocks.

Progressive western migration of V1- and V2-aged magmatism ceased during the V3 episode, by which time a majority of magmatism was focused along the western margin (Bastias et al., 2021). Trenchward migration of magmatism from the inland region in Patagonia was most likely caused by mechanism on the slab during ~188-160 Ma. Back-arc extension during V3 time led to the formation of oceanic lithosphere in the Rocas Verdes Basin (Stern & de Wit, 2003), which is exposed along southwestern Patagonia. The basement of the Rocas Verdes Basin is composed of pillow lavas, dykes and gabbros that have been interpreted as part of an ophiolite sequence that formed along a mid-ocean-ridge (Stern & de Wit, 2003). Bastias et al. (2021) suggested that the prime cause of an increased flux of mantle-derived material in the Rocas Verdes Basin may be related to decompression associated with crustal thinning, although its relationship, if any, to modifications of the slab architecture are unclear.

'Flat-slab' magmatism

While modern flat-slab are recognised to not form magmatism, robust evidence has been presented in the literature that suggest that the may be associated to magmatism (e.g. Humphreys et al., 2003; Navarrete et al., 2019). Furthermore, the Laramide Orogeny in western United States is a relevant example for the relationship between arc magmatism and flat-slab events (e.g. Humphreys et al., 2003). Although perhaps the mechanism is not clear in the case of the Chon-Aike magmatic province, we suggest that slab break-off may be the prevailing mechanism (cf. Haschke et al., 2002), in which the subducted plate sinks causing widespread magmatism and extension in the boyante plate (South America). This source of heat allowed significant melting of the basement, which later influenced the isotopic composition of minerals (Foley et al., 2023). We nevertheless acknowledge that further studies have to be conducted to further understand the role of flat-slabs on the generation of magmatism.

Conclusions

Late Triassic – Jurassic igneous rocks of the Antarctic Peninsula and Patagonia provide evidence for the evolution of the margin of southwestern Gondwana. Bastias et al. (2021) presented a compilation of geochronological, isotopic tracing and geochemical analyses to constrain the magmatic evolution and Late Triassic – Jurassic tectonic setting. The distribution of crystallization ages reveals four main magmatic pulses that collectively span ~225-145 Ma, all of which have compositions that are consistent with a continental arc setting. The first episode occurred between ~223-200 Ma, and records active margin magmatism within the Antarctic Peninsula and northern Patagonia and reveals the presence of a flat-slab that gave rise to magmatism in eastern Patagonia. After a period of magmatic quiescence (~200-188 Ma), the second episode occurred between ~188 and 178 Ma, with a continuation of arc magmatism above a flattened slab. The third episode spanned ~173-160 Ma, and its geographic distribution suggests the slab was steepening, driving magmatism towards the south and west in Patagonia. Finally, the fourth period occurred between ~157 and ~145 Ma, during which time magmas were emplaced along the Antarctic Peninsula and western Patagonia, with no evidence for flat-slab subduction. The Chon Aike magmatic province has been considered to have been influenced by the break-up of Gondwana, via heating associated with the Karoo plume in southern Africa and the active margin in western Patagonia and the Antarctic Peninsula. However, the compilation suggests that the Early - Middle Chon Aike Jurassic silicic magmatic province in Patagonia and the Antarctic Peninsula can be entirely accounted for by active margin processes (Bastias et al., 2021).

Keywords: arc magmatism, active margin, subduction, magmatic provinces, Antarctica.

Financing: JB was funded by the Swiss National Science Foundation (project P500PN_202847).

Acknowledgments: The authors are grateful for the extensive logistical support provided by the Instituto Antártico Chileno (INACH) during two field campaigns to the Antarctic Peninsula.

References:

- Bastias et al. 2019. International Geology Review, DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1655669>
- Bastias et al. 2020. Gondwana Research, v. 81, p. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.10.018>.
- Bastias et al. 2021. Lithos, 386–387, p. 106013. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106013>
- Bryan et al. 2002. In: Menzies, M.A., Klemperer, S.L., Ebinger, C.J., Baker, J. (eds) Magmatic Rifted Margins. Geological Society of America Special.
- Calderón et al. 2007. Journal of the Geological Society 164: 1011-1022, London
- Foley et al. 2023. Geosphere 19(4): 975-1005.
- Grunow, A. M. 1993. Geology, v. 21, p. 647–650.
- Haschke, M. et al. 2002. Terra nova, 14(1), 49-55.
- Hathway, B. 2000. Journal of the Geological Society, London, v. 157, p. 417–432. [doi:10.1144/jgs.157.2.417](https://doi.org/10.1144/jgs.157.2.417).
- Hervé et al. 2006. in Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences, edited by D. Futterer et al., pp. 217–228, Springer, Berlin.
- Hervé et al. 2007. Lithos 97, 373–394.
- Humphreys et al. 2003. International Geology Review, 45(7), 575-595.
- König, M., Jokat, W., 2006. Journal of Geophysical Research 111, B12102.
- Lawver et al. 1998. Mem Nation Inst Polar Res Spec Issue 53:214–229
- Mpodozis, C., Ramos, V., 2008. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (4), 481e497
- Navarrete et al. 2019. Earth Sci. Rev. 194, 125–159.
- Pankhurst et al. 2000. Journal of Petrology 41, 603-625.
- Riley et al. 2020. J. S. Am. Earth Sci.
- Riley et al. 2001. Journal of Petrology 42, 1043-1065.
- Stern, C.R. & de Wit, M.J. 2003. In: Dilek, Y. & Robinson, P.T. (eds) Ophiolites in Earth History. Geological Society, London, Special Publications, 218, 1–19.
- Thomson, S., Hervé, F., 2002. Revista de la Asociación Geológica de Chile 29 (2), 255–271.

Naturaleza geológica del basamento pre-Andino y su relación con la distribución espacial de terrenos acrecionados a lo largo del margen Andino (13°-43°S)

Álvaro Cárdenas Maripillán¹, Andrés Tassara Oddo¹, Verónica Oliveros Clavijo¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

El basamento cortical a lo largo del margen occidental activo de América del Sur tuvo una historia evolutiva compleja durante el Paleozoico, con eventos de separación, desplazamiento y acreción de terrenos a Gondwana (Ramos, 2010). Los mapas disponibles de distribución de terrenos representan sus límites, que se definieron originalmente reconociendo zonas de la corteza con características geológicas similares (litologías, estructuras, edades, etc.) y asociaciones de rocas específicas que pueden relacionarse con posibles suturas. Sin embargo, una representación gráfica de la heterogeneidad geoquímica del basamento andino, en particular de las razones isotópicas de Pb, a escala de todo el margen es escasa. Su realización proporcionará una caracterización isotópica más en detalle de la naturaleza de este basamento y una herramienta para la definición de la distribución espacial de terrenos, de manera de tener una mayor comprensión de su evolución tectónica pasada.

La generación de mapas de distribución espacial de razones isotópicas de Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), entre los 13-43°S y 65-75°W, se efectuaron a partir de la recopilación de >2.000 análisis de razones isotópicas actuales de Pb en roca total, de muestras de rocas ígneas y metamórficas del Proterozoico al Holoceno de diferentes bases de datos. La principal fuente fue la base de datos de acceso abierto GEOROC (Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents; Sarbas et al., 2021) de la cual se revisaron más de 515 artículos científicos. Adicionalmente, se incluyeron muestras desde Loewy et al. (2004), Lucassen et al. (2004), Mamani et al. (2008) y Oliveros et al. (2020).

Al analizar la correlación entre la distribución espacial de las muestras y sus tres razones isotópicas de Pb existe una consistencia en la ubicación de los dominios corticales menos y más radiogénicos, en relación al conjunto de datos. Sin embargo, presentan algunas diferencias en su extensión. Al observar el mapa que muestra la distribución de la razón $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ se distinguen claramente sectores en la corteza con diferente composición isotópica, identificándose siete dominios: cuatro no radiogénicos y tres radiogénicos. Considerando la razón $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,5$ descrita por Mamani (2006) como el límite radiogénico para la corteza de los Andes Centrales.

Los dominios no radiogénicos son: 1) Norte I, ubicado entre 15-22°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16,792-18,724$; 2) Norte II, ubicado entre 22-23,5°S, en rocas jurásicas de la Cordillera de la Costa, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,060-18,593$; 3) Sur I, ubicado entre 30-33,5°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17,768-18,727$; y 4) Sur II, ubicado entre 35-43°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,148-18,733$. En tanto, los dominios radiogénicos corresponden: 1) Norte, ubicado entre 13-15°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,530 - 18,933$; 2) Centro, ubicado entre 19-30°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,170-20,159$; 3) Sur, ubicado hacia la costa entre 30-43°S, posee razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,137-19,296$.

Al comparar la distribución espacial de los dominios isotópicos de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ con los mapas disponibles de distribución de terrenos es posible notar que el dominio radiogénico Norte coincide con el terreno de Paracas con un límite abrupto hacia el sur con terreno de Arequipa-Antofalla. En tanto, el dominio Norte I coincide con el Dominio de Arequipa descrito por Mamani et al. (2008), el cual no posee un límite abrupto con el dominio Centro, sino más bien gradual, lo cual coincidiría con la evolución del basamento de Arequipa-Antofalla descrita por Loewy et al. (2004). Al sur de los 30°S se ubica el dominio Sur I, cuyo límite occidental con el dominio radiogénico Sur es más o menos paralelo al supuesto límite entre Chilenia y Cuyania, pero está desplazado más hacia el oeste. En tanto, al sur, este límite ahora con el dominio Sur II, es más difuso, pero al parecer significativamente más hacia el oeste. Finalmente, al sur de los 39°S, el dominio Sur II coincidiría con los terrenos de Patagonia.

Palabras Clave: Naturaleza, Basamento, Terrenos, Isótopos de Pb.

Referencias:

- Aitchison, S., Harmon, R., Moorbath, S., Schneider, A., Soler, P., ... & Wörner, G. (1995). Pb isotopes define basement domains of the Altiplano, Central Andes. *Geology*, 23(6), 555-558.
- Álvarez, J., Mpodozis, C., Arriagada, C., Astini, R., Morata, D., ... & Vervoort, J. (2011). Detrital zircons from late Paleozoic accretionary complexes in north-central Chile (28–32°S): possible fingerprints of the Chilenia terrane. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 460-476.
- Loewy, S., Connelly, J., & Dalziel, I. (2004). An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Geological Society of America Bulletin*, 116(1-2), 171-187.
- Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vázquez, P., Romer, R., & Figueroa, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103-119.
- Macfarlane, A., Marcet, P., LeHuray, A., & Petersen, U. (1990). Lead isotope provinces of the Central Andes inferred from ores and crustal rocks. *Economic Geology*, 85(8), 1857-1880.
- Mamani, M., Tassara, A., & Wörner, G. (2008). Composition and structural control of crustal domains in the Central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(3), 1-13.
- Mamani, M., Wörner, G., & Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Bulletin*, 122(1-2), 162-182.
- Oliveros, V., Vázquez, P., Creixell, C., Lucassen, F., Ducea, M. N., Ciocca, I., ... & Kasemann, S. A. (2020). Lithospheric evolution of the Pre-and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 80, 202-227.
- Ramos, V. (2010). The Grenville-age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 77-91.

Geología de Bahía Esperanza y zonas adyacentes, Lago O'Higgins, Región de Aysén, Chile

Joan Gutierrez-Ordenes¹, Manuel Suárez¹

(1) Universidad Nacional Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

El basamento metamórfico Paleozoico correspondiente al Complejo Metamórfico Andino Oriental (CMAO), definido por Hervé (1993), se encuentra situado en los Andes Patagónicos, siendo uno de los complejos metamórficos más extensos del país, ya que constituye gran parte de la Patagonia chilena, extendiéndose como una franja elongada norte-sur desde el Lago General Carrera, hasta aproximadamente el extremo meridional de Campo de Hielo Sur, a la latitud de Puerto Natales. Este complejo se caracteriza por su metamorfismo de bajo grado y polideformación de sus rocas, dentro del cual aún persisten debates con relación al ambiente de depositación inicial y régimen tectónico en el cual sufrió la deformación, ya que las características de la proveniencia de los sedimentos y las condiciones de presión y temperatura de su metamorfismo, aún no han permitido deducir su evolución de manera concluyente (Augustsson & Bahlburg, 2003 a, b).

Bahía Esperanza, ubicada en una de las zonas más remotas del Lago O'Higgins, cuenta con escasos estudios directos sobre su geología, lo cual ha brindado solo indicios preliminares de la composición geológica, donde de forma generalizada se asigna que esta zona pertenece al CMAO (Skarmeta & Di Biase, 1975; De la Cruz *et al.*, 2004). Por lo tanto, ante la falta de información detallada, surge la interrogante de que si las rocas de Bahía Esperanza presentan similitudes en su composición, grado metamórfico y estructuras en comparación con el CMAO descrito en otras zonas. Siendo lo anterior el propósito final de este estudio, aportando nueva información detallada, contribuyendo a la geología regional del Lago O'Higgins.

Las rocas del CMAO expuestas en Bahía Esperanza, están formadas por unidades de metapelitas (pizarras, filitas y esquistos micáceos) y metaareniscas cuarcíferas en alternancia. Además, gracias al presente estudio se levantó nueva información de unidades para esta zona, siendo caracterizadas como unidades de metaconglomerados e hipabisales riolíticos, estos últimos intruyendo al CMAO. Por otra parte, se identificaron cuatro eventos de deformación (D1, D2, D3, D4) correlacionables a los descritos por Bell & Suárez (2000). El evento D1 es representado por una foliación de carácter planar penetrativa continua, además de presentar una posible transposición de estructuras previas. Durante el evento D2 se desarrolla la foliación regional S2 presente en el área, siendo caracterizada por una foliación planar penetrativa continua en capas metapelíticas y espaciada localmente en las unidades de metaareniscas cuarcíferas, donde también esta foliación es paralela al plano axial de pliegues isoclinales, en algunos casos desarraigados. Datos estructurales para la foliación principal S2, entregan orientaciones preferenciales NE-SO. Las estructuras asociadas al evento D3 corresponden a planos de clivajes extensionales asociados a cizalle y estructuras de esquistosidad y cizalle (S-C). Por último, el evento D4, contiene pliegues tipo chevrón con orientación del plano axial N-S, y también conglomerados tectónicos (seudo-taquilita), relacionadas a fallas por régimen de deformación frágil en zonas de cizalle.

Dentro del CMAO se presentan diversos registros que caracterizan a este complejo con gran cantidad de vetas, especialmente de cuarzo. Esto también se aplica a las rocas expuestas de Bahía Esperanza, donde existen diversas configuraciones. Estas vetas se presentan observables a múltiples escalas, las cuales en este trabajo se caracterizan en tres asociaciones principales. La primera (V1), corresponden a planares erráticas, denominadas así por sus múltiples orientaciones preferenciales, alojadas principalmente en unidades de metaareniscas cuarcíferas. En segundo lugar, se encuentra las asociaciones de vetas syn-tectónicas (V2), definidas así por su estrecha relación genética con los eventos deformativos ocurridos en el CMAO, debido a que su geometría sinuosa, es correlacionable con la foliación regional S2. La última asociación de vetas descrita es la de planares paralelas (V3), atisbando un proceso posterior al tectónico, que pueden ser producto de los intrusivos posteriores que intruyen al CMAO (Hipabisales Riolíticos).

El trabajo de campo en este estudio ha permitido dilucidar que la geología del CMAO en Bahía Esperanza y alrededores coincide con la descrita por diversos autores en otras áreas del complejo, dividida en dos unidades principales en alternancia, metapelitas y metaareniscas cuarcíferas, además de la nueva información de unidades levantadas en este trabajo, definidas como unidades de metaconglomerados e hipabisales riolíticos. Late Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and, como también su polideformación en las cuatro etapas descritas.

Palabras Clave: Complejo Metamórfico Andino Oriental, Geología Estructural, Petrología Metamórfica, Patagonia, Geología Regional.

Financiamiento: Instituto Chileno de Campos de Hielo Proyecto FIC Aysén BIP 40000501-0.

Referencias:

- Augustsson, C., Bahlburg, H., (2003a). Active or passive margin? Geochemical and Nd isotope constraints of metasediments in the backstop of a pre-Andean accretionary wedge in southernmost Chile (46°30'-48°30'S). Geological Society, London, Special Publications, 253-268 p.
- Augustsson, C., Bahlburg, H., (2003b). Cathodoluminescence spectra of detrital quartz as provenance indicators for Paleozoic metasediments in southern Andean Patagonia. South American Earth Sciences 16, 15-26 p.
- Bell, C. M., & Suárez, M. (2000). The Rio Lácteo Formation of southern Chile. Late paleozoic orogeny in the Andes of southernmost South America. Journal of South American Earth Sciences, 13(1-2), 133-145.
- De la Cruz, R.; Welkner, D.; Suárez, M.; Quiroz, D. (2004). Geología del Área Oriental de las Hojas Cochrane y Villa O'Higgins, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 85. Mapa escala 1:250.000. 7-9 p.
- Hervé, F. (1993). Paleozoic metamorphic complexes in the Andes of Aysén, Southern Chile (West of Occidental). In first Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference, Proceedings. 64-65 p.
- Skarmeta, J., & Di Biase, F. (1975). Geología del Río Pascua y zonas adyacentes, provincia de Aysén, XI Región, Chile. Informe (inédito), Instituto de Investigaciones Geológicas-Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA), 64 p. Santiago de Chile.

Is the presence of fossil micrometeorites in the Tarlton limestone, Archipelago Madre de Dios (50° S), possible?

Juan Pablo Letelier Araya¹, Francisco Hervé Allamand¹⁻², Pierre-Yves Descote¹, Rebeca Álvarez¹, **Solangel Moncada¹**, Daniela Zavala¹

(1) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, República 220, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Micrometeorites are extraterrestrial dust particles comprising a size of <2 mm in diameter that have survived entry into the Earth's atmosphere, and they serve to provide information on the origin and evolution of asteroids and comets, and the flux variation of dust reaching Earth due to perturbations (Genge et al., 2008). These particles can be recovered from sedimentary rocks throughout the geologic record (Suttle and Genge, 2017c), and they are known to be present among microfossil debris (Suttle et al., 2017). Letelier and Valenzuela (2020) analyzed the statistics of 42 micrometeorite collections in the world and found that 61% of the rock types sampled corresponded to limestone. An example corresponds to the cosmic particles found in Ordovician limestones of the Las Aguditas Formation, in the Andean Precordillera (Voldman et al., 2012).

In Chile, the largest limestone exposures are found in the Madre de Dios archipelago (50°S), characterized by the Tarlton unit which has an age comprised between Middle Pennsylvanian and Early Permian, which also have a recognized fusulinid foraminifera content (Cecioni, 1956; Douglas and Nestell, 1976) and a secondary remanent magnetism modified by the intrusion of the Patagonian Batholith in Cretaceous times (Rapalini et al., 2001).

Considering these aspects, new questions are open: ¿Is the presence of horizons with benthonic foraminifera a favorable marker to establish conditions for the preservation of fossil micrometeorites in these limestones? ¿The mineral phases with magnetism in the limestones have a terrestrial or an extraterrestrial origin? To elucidate this, we collected 18 samples of the Tarlton limestone at the Seno Soplador, Madre de Dios Island. Ongoing petrographic studies by polarizing microscope, X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) will reveal the composition and structure of the mineral phases present, as well as the textural implications of diagenetic and/or post-diagenetic processes. Additionally, physical, and chemical treatment of crushed samples will allow the recovery of the magnetic particles and to characterize the possible presence of fossil micrometeorites among them.

Keywords: Madre de Dios, Accretionary Complexes, Tarlton Limestones, Fossil Micrometeorites.

Acknowledgments: Acknowledgments to the Fundación Prisma Austral and Proyecto de Exploración ANID N°13220141 for field and laboratory support respectively.

References:

- Cecioni, G., (1956). Instituto de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Chile.
- Douglas, R.C., Nestell, M.K., (1976). U.S. Geological Survey, Special Paper 858, 49.
- Genge, M.J., Engrand, C., Gounelle, M., & Taylor, S., (2008). Meteorit. Planet. Sci. 43, 497–515.
- Letelier, J.P.; Valenzuela, M. (2020). XVI SOCHIAS Annual Meeting.
- Rapalini, A., Hervé, F., Ramos, V., & Singer, S., (2001). Earth and Planetary Science Letters. 184. 471-487.
- Suttle, M., Genge, M. J. & Miller, C. (2017). Paleontological Association Annual Meeting (PALASS) 2017.
- Suttle, M. & Genge, M. J. (2017c). Earth and Planetary Science Letters 476, 132-142.
- Voldman, G. G., Genge, M. J., Albanesi, G. L., Barnes, C. R., & Ortega, G. (2013). Geological Journal, 48(2-3), 222-235.

Laguna Amarga Metamorphic Complex (27° 15' - 27° 40' latitude South) Cordillera de Catamarca, Argentina: geology, geochronology, and geodynamic settings

Juan Enrique Otamendi¹, Eber Cristofolini¹, Augusto Morosini², Facundo Escribano¹, Andrea Galli³, Matías Barzola¹, Paula Armas¹

(1) Universidad Nacional de Río Cuarto, Geología - ICBIA - CONICET, Ciencias Exactas Físico Químicas y Naturales, X5804BYA Campus Universitario, Río Cuarto, Argentina

(2) Universidad Nacional de San Luis, Geología, Ciencias Físico Matemáticas y Naturales, D5700HHW Ejército de los Andes 950, San Luis, Argentina

(3) ETH Zurich, Earth Sciences, Institute for Geochemistry and Petrology, CH-8092 Clausiusstrasse 25, Zurich, Suiza

The crystalline basement of Laguna Amarga Metamorphic Complex (LAMC) occurs as a separate block of fault-bounded mountain ranges between the Cenozoic eruptive volcanic fields of the Andes of Catamarca. The exposures of crystalline basements appear between the Cazadero Grande River and the Valle Ancho depression in west Catamarca. The LAMC is a complex and heterogeneous lithostratigraphic unit that provides insights into the tectonic evolution of the Andes of Catamarca. These fault-bounded blocks of the LAMC are also evidence of a complex tectonic history, which includes multiple episodes of deformation and metamorphism. For this reason, the complex has been mapped and subdivided into the Cazadero Grande Association and the Los Aparejos Metamorphic Association. The Cazadero Grande Association is characterized by amphibolite-facies metasedimentary rocks and ortho-amphibolites, which are grouped into three lithological units: Aguada de Tambillo Unit: This unit is composed of metamorphosed siliciclastic rocks, including gneisses, quartzites, and cherts. Puesto Verde Unit: This unit is constituted by marbles and calc silicate gneisses. El Quemadito Unit: This unit is dominated by ortho-amphibolites. The Los Aparejos Metamorphic Association comprises two granulite-facies lithostratigraphic units: Lagunas Frías Unit consists of prevailing siliciclastic-derived migmatites with subordinate marbles. Pirca Negra Unit: This unit is formed by meta-mafic rocks. We report new detrital and metamorphic zircon ages that combined with petrological and structural analysis allow addressing a stratigraphic correlation of the LAMC at a regional scale. Analysis of zircon core in all samples is concordant with a statistically strong constrained age range between 1,000 and 1,370 Ma. The Late Mesoproterozoic ages (1,100-1,000 Ma) of the sedimentary protolith of the LAMC are interpreted as the inheritance ages. The absence of typical zircon ages of Gondwana landmasses (e.g., 650-600 Ma related to the Brasiliano-Pan-African orogenic systems) suggests that the detritus that formed the protoliths did not come from Gondwanan landmasses. Instead, detrital zircon ages are consistent with the provenance of the sedimentary deposits derived from a Laurentian source area, such as the southern Appalachian Grenvillian and the Granite-Rhyolite Igneous Province. Therefore, the continental crustal sources of the detritus that generated the protoliths for the LAMC metasedimentary sequences were most likely of Laurentian affinity. We speculated that the lack of Paleo-Proterozoic ages suggests that the LAMC cannot be correlated to either the Arequipa-Antofalla terrane or a hypothetical MARA block. The detrital zircon age provenance implies that a narrow belt separates the LAMC from the Ordovician arc exposed in the Sierra de Las Planchadas. This region may represent a suture zone between the autochthonous Famatinian arc and the allochthonous Cuyania terrane. If this finding were correct, the suture would be considered the northward extension of the Valle Fértil lineament. Our ongoing study of the LAMC will bring out implications for understanding the evolution of the Paleozoic basement between the Famatinian arc and the continental crust underlying the Andes Cordillera.

Keywords: Gondwana margin, Gondwana-Laurentia connection, Central Andes basement.

Financing: Financial support for the research is provided by MinCyT-FONCyT-Argentina grant PICT-A 0296/17, PICT-A 0056/19, PICT-A 3178/20, PICT-A 0055/21; SeCyT-UNRC (PPI-GC564, GC573) and CONICET (PIP 2016-11220130100628), Argentina.

Eventos de deformación durante el Paleozoico superior en el margen suroccidental de Gondwana y a lo largo de la transecta Valdivia–Liquiñe (Andes Norpatagónicos, 40°S)

Camilo Palape¹⁻², Nemesio Heredia Carballo³, Joaquín García-Sansegundo¹, Pedro Farías¹, Andrés Cuesta¹, Francisco Hervé⁴⁻⁵, Jesús Muñoz-Montecinos⁶, Andrea Giuliani⁷

- (1) Universidad de Oviedo, Departamento de Geología (Área de Geodinámica Interna), c/ Jesús Arias de Velasco, s/n. 33005, OVIEDO (Asturias), España
 (2) Universidad Central de Chile, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Santa Isabel 1186, Edificio VK1, Santiago, Chile
 (3) Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, c/ Matemático Pedrayes 25, 33005, Oviedo (Asturias), España
 (4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 (5) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Sazie 2119, Santiago, Chile
 (6) ETH Zürich, Department of Earth Sciences, Structural Geology and Tectonics Group, Geological Institute, Sonneggstrasse 5, 8092, Zürich, Switzerland
 (7) ETH Zürich, Department of Earth Sciences, Institute of Geochemistry and Petrology, Clausiusstrasse 25, CH-8092, Zürich, Switzerland

En la Región de Los Ríos de los Andes Norpatagónicos (40°S), afloran rocas metamórficas paleozoicas deformadas durante la Orogenia Gondwánica. A esta latitud y según Heredia et al. (2016, 2018) y Serra-Varela et al. (2022), esta orogenia se desarrolló en dos estadios. Entre el Devónico Medio y el Carbonífero superior, la Orogenia Gondwánica se relaciona con la subducción de la placa Paleo-Pacífica bajo el margen de Gondwana (Orogenia Gondwánica de subducción), que culmina entre el Carbonífero superior al Pérmico inferior con un proceso colisional (Orogenia Gondwánica colisional) que los autores relacionan con la acreción a Gondwana de la Antártida Occidental. Este trabajo pretende reconocer y caracterizar los eventos de deformación asociados a la Orogenia Gondwánica en la transecta Valdivia–Liquiñe (40°S). En el área de estudio se distinguen las siguientes unidades: (i) El Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM–Serie Occidental; Duhart et al., 2001), formado por metapelitas, metabasitas, milonitas, paragneisses, metavolcanitas, metacherts, metagabros y serpentinitas, yuxtapuestos en un canal de subducción, de edad devónica a pérmica; (ii) Complejo Metamórfico El Trafún (CMT–Serie Oriental; Martin et al., 1999), compuesto por metasedimentos de antearco, de edad devónica a carbonífera. Con base en nuevos datos cartográficos, estructurales, micro-estructurales, petrológicos y geocronológicos, se han reconocido 3 etapas de deformación gondwánicas que se desarrollaron bajo diferentes condiciones P-T y que afectan de forma desigual a ambos complejos. En el CMBM, las estructuras D1 consisten en una foliación (S1ap) desarrollada bajo condiciones metamórficas AP-BT, la cual aparece preservada en porfidoblastos de albita, definida por apatito, epidota y mica blanca y afectada por micropliegues. Esta deformación debió de tener lugar en las proximidades de la zona de subducción gondwánica. Por otra parte, las estructuras D1 en el CMT son pliegues recumbentes vergentes al E, cuyo clivaje S1bp se desarrolló bajo condiciones metamórficas de BP-IT. Las estructuras D2 sólo se presentan en el CMBM y están asociadas a una foliación milonítica S2 penetrativa, desarrollada fundamentalmente en una faja de unos 300 m de anchura que afecta a metabasitas serpentinizadas (Orellana, 2016) con micaesquistos a su techo. En la zona de cizalle se observan porfidoblastos de albita sigmoidales con dos fases de crecimiento, estructuras S-C-C', foliación orientada y cintas de cuarzo que indican una dirección de transporte tectónico de bloque superior hacia el E. Esta deformación se propagó a niveles estructurales más superficiales desarrollando en el CMT los pliegues recumbentes D1 y el clivaje S1bp. Posteriormente, la región fue afectada por estructuras D3, que consisten en pliegues abiertos, derechos, con dirección WNW-ESE que en sus charnelas desarrollan un clivaje de crenulación S3. En el margen oriental del CMT cercano al contacto con el Batolito Futrono, datado en 306±2 Ma (Deckart et al., 2014), se encontraron porfidoblastos de andalucita que son post-S1bp y pre-S3, por lo que el evento deformativo D1 del CMT es previo al metamorfismo de contacto asociado al emplazamiento del batolito.

Adicionalmente se han obtenido tres edades Rb/Sr *in situ* en mica blanca desarrolladas con la foliación S2 y que de O a E se localizan en: i) la faja milonítica del CMBM en Caleta San Juan con una edad de 262±10 Ma y posiblemente afectada por el Plutón Chaihuín del Cretácico Superior, situado a 7 km, ii) una metasamopelita del CMT en Folilco con 280±6 Ma, posiblemente relacionada con el desarrollo del corrimiento dúctil fuera de secuencia de Folilco (CF), y iii) un paragneis del CMBM en Liquiñe de 97±3 Ma, edad rejuvenecida por el magmatismo meso-cenozoico del Ciclo Andino, muy abundante cerca del eje cordillerano. Con estos datos se interpreta que la foliación milonítica S2 del evento deformativo D2 del CMBM representa la exhumación del canal de subducción y/o prisma de acreción basal mediante un corrimiento dúctil dirigido al E (Cabalgamiento de la Caleta San Juan, CCSJ). Debido a los pliegues D3 y a la presencia de estructuras laterales, el CCSJ muestra un trazado sinuoso. Este corrimiento tiene un desplazamiento kilométrico y superpuso zonas próximas a la subducción gondwánica sobre la cuenca de antearco, que alcanza el eje de la Cordillera Patagónica y posiblemente territorio argentino algo más al sur (entorno de Bariloche, García-Sansegundo et al., 2009). El CCSJ se produjo anteriormente al emplazamiento del Batolito Futrono (Carbonífero superior alto), mientras que el CF se propagó por la zona, previamente deformada, en un evento posterior de edad Pérmico inferior (c.a. 280 Ma), siendo todos ellos resultado del evento colisional gondwánico.

Palabras Clave: Orogenia Gondwánica, Faja Milonítica, Metamorfismo, Edades Rb-Sr *in situ*, Estructura.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por los recursos del Proyecto ANID Explorador 13220141, y del proyecto CANALAB MCI-21-PID2020-118228RB-C21 del Plan Español de I+D+i.

Agradecimientos: Se agradece a la geóloga Natalia López por las observaciones metasedimentarias y las valiosas discusiones en terreno. Agradecemos también al Dr. Mauricio Calderón por su asistencia y apoyo en terreno.

Referencias:

- Deckart, K. Hervé, F. Fanning, C., et al. 2014, U-Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean Geology* 41 (1): 49-82.
- Duhart, P. McDonough, M., et al. 2001. El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'-42°00' S): geocronología K-Ar, Ar/Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 28, No. 2, p. 179-208.

- García-Sansegundo, J. Farias, P., et al. 2009. Structure and metamorphism of the Gondwanan basement in the Bariloche region (North Patagonian Argentine Andes). *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 98, No 7, p. 1599-1608.
- Heredia, N. García-Sansegundo, J. Gallastegui, G., et al. 2016. Evolución Geodinámica de los Andes de Argentina, Chile y la Península Antártica durante el Neoproterozoico superior y el Paleozoico. *Trabajos de Geología*, Vol. 35, p. 237-278.
- Heredia, N. García-Sansegundo, J. Gallastegui, G., et al. 2018. The Pre-Andean Phases of Construction of the Southern Andes Basement in Neoproterozoic–Paleozoic Times In: Folguera, A., et al. *The Evolution of the Chilean-Argentinean Andes*. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham.
- Martín, M. Kato, T., et al. 1999. Evolution of late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south-central Chile (38°-41°S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*, Vol. 18, No. 4, p. 582-605.
- Orellana, F. 2016. Petrología de las rocas máficas y ultramáficas en la serie occidental del Centro sur de Chile (39°-40°S). Tesis de Magister en Ciencias (Mención Geología), Universidad de Chile, 139 pp
- Serra-Varela, S. Heredia, N. Giacosa, R., et al. 2022. Review of the polyorogenic Palaeozoic basement of the Argentinean North Patagonian Andes: age, correlations, tectonostratigraphic interpretation, and geodynamic evolution. *International Geology Review*, 64:1, 72-95.

Extension of the Chaitenia back-arc further north: new evidence from geochemistry and metamorphic ages of mafic rocks from the Western Series (38°33' - 40°52'S)

Gaëlle Plissart¹, Fiona Cabrera², Juan Carlos Moral⁵, Alexandre Corgne¹, Carolina Pavez², Aníbal Rivera², Christophe Monnier³, Julien Berger⁴

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Ciencias, Valdivia, Chile

(3) Nantes Université, Département des sciences de la Terre et de l'univers, Nantes, France

(4) Université Paul Sabatier, Géosciences Environnement Toulouse, Toulouse, France

(5) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Concepción, Chile

The current South American basement between 27 and 47°S is classically interpreted as being constructed from several tectonic blocks accreted to the SW Gondwanan margin during the Paleozoic, as well as from tardi-Paleozoic accretionary complexes [1, 2, 3]. However, the segment between 37°40'S and 41°40'S is located at the boundaries between three different microblocks (Chilenia, Chaitenia and North Patagonia) whose provenance, evolution and limits are still debated, making geodynamic reconstructions difficult [4]. The Chaitenia terrane corresponds to a Devonian oceanic island arc (395-360 Ma), issued from the rifting of the North Patagonian fore-arc by slab roll-back [5, 6]. Its individualization led to the opening of a back-arc, well defined at the 41-43°S latitudes, which would have rapidly closed during the Carboniferous (360-340 Ma) [5, 6]. In this framework, our study focuses on the tectonic origin and age of metamorphism of mafic protoliths sampled north of the defined Chaitenia block, between 38°33' and 40°52'S, in the basal accretionary sequences of the Western Series.

We performed petrographic characterizations and bulk-rock analyses of a total of 49 samples. We identified 5 main lithotypes: garnet-bearing amphibolites with counterclockwise paths (La Cabaña and Los Pabilos), fresh to variously retrograded blueschists (San Carlos, Manquemapu and Los Pabilos), greenschists (all the areas), albite-bearing metabasites (all along the Valdivia and Bahía Mansa coasts) and metagabbros (Bonifacio). 9 separate groups can be defined based on trace element geochemistry: OIBs, E-MORBs, E-MORBs with slight negative Nb anomaly, N-MORBs with small enrichment in LREEs and slight to no Nb anomaly, N-MORBs with slight negative Nb anomaly, LREE-depleted N-MORBs with high negative Nb anomaly, BABs, IABs, and FABs. The OIBs and E-MORBs are restricted to the Valdivia-Bahía Mansa coasts and Bonifacio, respectively. The Valdivia coast also displays the majority of N-MORBs with small enrichment in LREEs and slight to no Nb anomaly. In contrast, the high-pressure rocks (garnet-bearing amphibolites and blueschists) collected at La Cabaña, Manquemapu, San Carlos and Los Pabilos nearly systematically show chemical characteristics indicating that their protoliths formed in an arc to back-arc system (N-MORBs and E-MORBs with negative Nb anomaly, BABs, IABs, FABs).

Ar-Ar in situ dating on amphiboles from the La Cabaña garnet-bearing amphibolite gave 3 ranges of ages: (i) 311-299 Ma, interpreted as the hornblende cooling from peak temperatures down to 500°C, (ii) 277-270 Ma, interpreted as the crystallization of actinolite and time of the hydration event corresponding to the rocks emplacement in the metasedimentary tail of the prism, and (iii) 250-240 Ma, interpreted as the recrystallization of actinolite inside the accretionary prism. We also performed Ar-Ar in situ dating on phengites from the San Carlos blueschists, distinguishing 4 age ranges: (i) 340-320 Ma, observed in fresh rocks and preserved grains that did not suffer the subduction channel mylonitic event, probably crystallizing during the subduction of the protolith in blueschist facies conditions, (ii) 310-300 Ma interpreted as the recrystallization ages of grains during the mylonitic event in the channel under blueschist facies conditions and with subduction vergence, (iii) 280-270 Ma, corresponding to the recrystallization ages of grains in retrograde conditions with exhumation vergence, and (iv) 240-230 Ma, interpreted as recrystallization ages inside the prism.

Altogether, our geochemical and age results indicate that the Chaitenia arc and back-arc system extended further north, up to the current latitude of 37°40'S. This agrees with Devonian detrital zircon ages (365-380 Ma) reported in the enclosing schists of the La Cabaña ultramafic body [7] and with the presence of chromitites and counterclockwise PT path recorded in the ultramafic La Cabaña massif [8, 9]. Also, the presence of E-MORBs and OIBs in the Valdivia-Bahía Mansa coastal outcrops, and the lack of back-arc evidence there, could be linked to higher erosion by exhumation in this area, permitting the exposure of younger slices, which were accreted later within the base of the prism (250 Ma, [12]). These slices would derive from a seamount-bearing, large oceanic basin located at the west of the Chaitenia arc, similar to the rocks of Punta Sirena and Pichilemu [3]. Nd isotope analyses for one representative sample of each of the 9 chemical groups are currently underway to fully discriminate their source.

Keywords: Chaitenia, back-arc, Ar-Ar, Gt-bearing amphibolites, blueschists.

Financing: Fondecyt Iniciación 11150635. Mechanical effects upon metamorphism: a case study of the subduction channel and basal accretion processes preserved in the paleo-prism of the southern Chilean Coastal Cordillera (38°-42°S).

References:

- [1] Ramos et al. 1986. Paleozoic terranes of the Central Argentine Chilean Andes. *Tectonics* 5, 855-880.
- [2] Willner et al. 2011. The geodynamics of collision of a microplate (Chilenia) in Devonian times deduced by the pressure-temperature-time evolution within part of a collisional belt (Guarguaz Complex, W-Argentina). *Contrib. Mineral. Petrol.* 162(2), 303-327.
- [3] Hyppolito et al. 2014. The nature of the Paleozoic oceanic basin at the southwestern margin of Gondwana and implications for the origin of the Chilenia terrane (Pichilemu region, central Chile). *Int. Geol. Rev.* 56, 1097-1121.
- [4] Pankhurst et al. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth Sci. Rev.* 76(3), 235-257.
- [5] Hervé et al. 2018. The country rocks of Devonian magmatism in the North Patagonian Massif and Chaitenia. *Andean Geol.* 45(3), 301-317.
- [6] Rappela et al. 2021. The Devonian accretionary orogen of the North Patagonian cordillera. *Gondwana Research* 96, 1-21.

- [7] Romero et al. 2017. Timing the tectonic mingling of ultramafic rocks and metasediments in the southern section of the coastal accretionary complex of central Chile. *Int. Geol. Rev.* 60(16), 2031–2045.
- [8] Gonzalez-Jimenez et al. 2014. Geodynamic implications of ophiolitic chromitites in the La Cabaña ultramafic bodies, Central Chile. *Int. Geol. Rev.* 56, 1466–1483.
- [9] Plissart et al. 2019. Tectono-metamorphic evolution of subduction channel serpentinites from South-Central Chile. *Lithos* 336–337, 221–241.
- [10] Kato et al. 2008. Inception of a Devonian subduction zone along the southwestern Gondwana margin. *Can. J. Earth Sci.* 45, 337–351.
- [11] Hyppolito et al. 2014. Late Paleozoic onset of subduction and exhumation at the western margin of Gondwana (Chilenia Terrane). *Lithos* 206–207, 409–434.
- [12] Glodny et al. 2005. Internal dynamics of a paleoaccretionary wedge: insights from combined isotope tectonochronology and sandbox modelling of the South-Central Chilean forearc. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 231, 23–39.

Geodynamic constraints of Patagonia, Tierra del Fuego and Antarctic Peninsula crustal blocks within the Terra-Australis Orogen

Diego Andrés Rojo Martel¹, Mauricio Calderón², Matías Ghiglione¹

(1) Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

(2) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Av. Plaza 680, Santiago, Chile

After the consolidation and break-up of Rodinia, the reorganization of the tectonic plates favored the amalgamation of Gondwana, thus important sedimentary basins reported in it are somehow linked to the Brazilian / Pan African orogeny. The sedimentary basins of southern Gondwana and their respective detrital zircon U-Th-Pb can be used as a proxy to give light to the close relationship among the orogenic phases (e.g., Grenville, Brasiliano/Pan African, Pampean, Famatinian, Gondwana), sedimentary basins and igneous and metamorphic belts (Fig. 1). We use an approach analyzing the presence of Neoproterozoic to upper Paleozoic magmatic, metamorphic, and sedimentary rocks along Gondwana and the patterns of detrital zircon exhibited in the fossil basins to elucidate an important part of the history and geological evolution of this supercontinent.

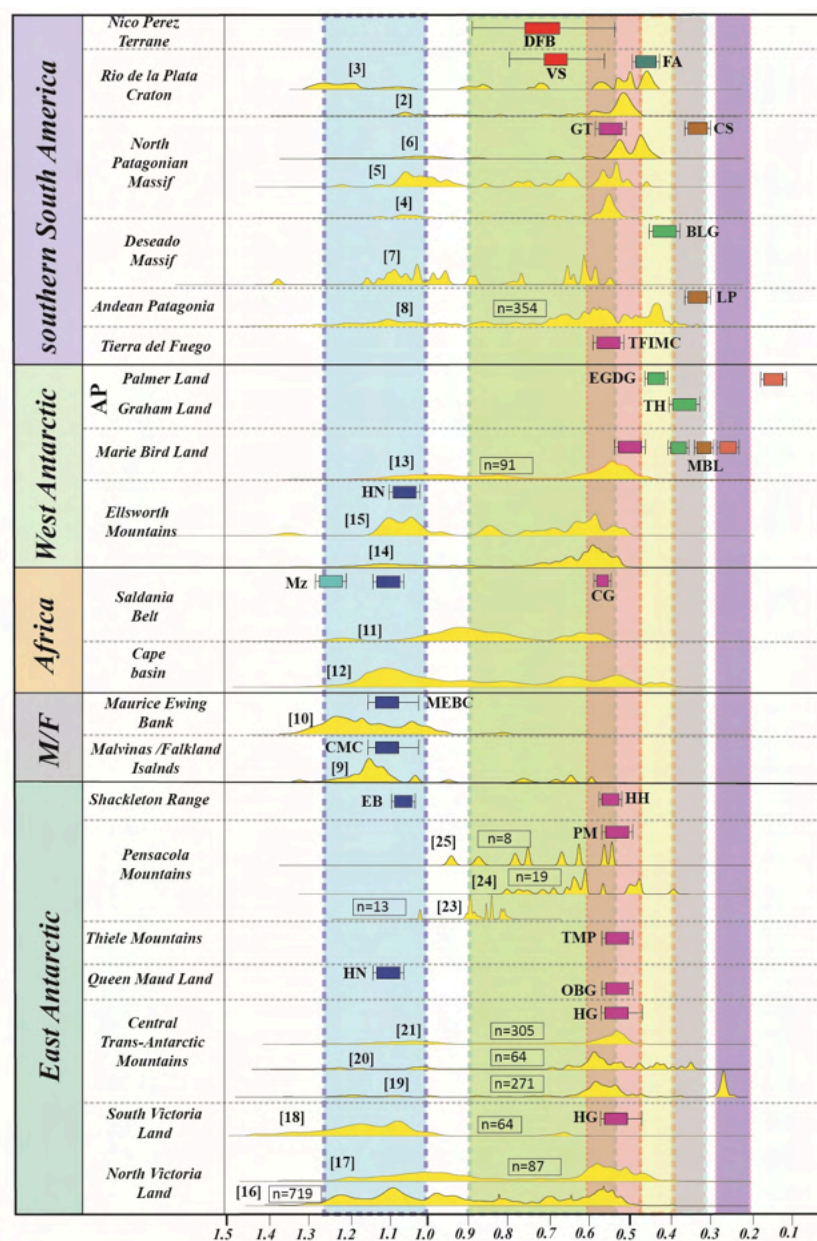


Figure 1. Compilation of ages of detrital zircons from Gondwana basins. HG: Harbour Granite; OB: O'Brigan Granite; HN:Haag Nunatak; TMP:Thiele Mountains Porphyry; PM: Pensacola Mountains; CMC: Cape Meredith Complex; MEBC: Maurice Ewing Bank; Cg: Cape Granite; MBL:Marie Bird Land; TH:Target Hill; TFIMC: Tierra del Fuego Igneous and Metamorphic Complex; BLG:Bahia Laura Granite; LP: Leones Pluton; GT: Tardugno Granodiorite; DFB:Dom Feliciano Belt. * The numerical values correspond to the number of ages of the detrital zircons considered.

In **South America**, particularly in the Río de la Plata Craton, as well as in the North Patagonian and Deseado massifs, the detrital zircon patterns show a peak provenance ca. 1.0-1.2 Ga, suggesting that they were derived from **Grenvillian sources** (Fig. 1). The hypothetical in situ oldest potential sources showing ages ranging from 1.0 to 1.2 Ga along inner belts cropping out in Queen Maud Land and Ellsworth Mountains (e.g., Haag Nunatak), Africa (e.g., Namaqua Natal Complex), as well as in the Malvinas/Falkland Islands and Maurice Ewing Bank (e.g., Cape Meredith Complex). It is important to consider that these materials are found in depocenters that are even younger, so these patterns probably correspond to recycled materials derived from older sedimentary basins, as proposed by Suárez et al. (2020). Analogously, the sedimentary basins in the southern parts of **Africa** (e.g., Saldania belt, Cape basin) show a notorious peak ca. 1.0-1.2 Ga, probably sourced from proximal areas (e.g., Mzumbre arc). The presence of materials even older than the basins themselves suggests the existence of recycling periods of ancient sedimentary areas or basins (e.g., Namaqua Natal Complex). In the **Malvinas/Falkland Plateau** Grenvillian peaks are reported from both the Malvinas/Falkland Island and Maurice Ewing Bank, and contemporaneous in situ ages correspond to potential supply sources (Fig. 1); Grenvillian peaks in East Antarctica are most conspicuously reported in the South and North Victoria lands sequences, and less evident in the Central Transantarctic Mountains.

In South America, the record of **Pan-African detrital zircon peaks** has been observed in the Río de la Plata Craton (e.g., Ventania System), North Patagonian Massif (e.g., Sierra Grande), and Deseado Massif (e.g., Cabo Blanco). Although the sedimentary successions were deposited in relatively younger basins, an igneous and metamorphic belt corresponding to the Dom Feliciano belt was laid down during the Brasiliano/Pan-African orogeny, which is even thought to have extended into the crystalline Sierra de la Ventana basement (Fig. 1). In West Antarctica, no in situ records of potential sources for the peaks associated with this orogeny have been reported.

Although there are no records of **lower Cambrian** rocks associated with the **Pampean orogeny** in the Deseado Massif region, they have been detected in the crystalline basement of Tierra del Fuego (e.g., Söllner et al. 2000; Hervé et al. 2003; Pankhurst et al. 2003). Additionally, the sedimentary basins of southern South America show important detrital zircon population that support a major source linked to the Pampean orogeny, as shown by the spectra of detrital zircons for the Río de la Plata Craton, the North Patagonian Massif, the Deseado Massif as well as the Andean Patagonia segment (Fig. 1). In West Antarctica, important contributions from Pampean sources are found in the Palmer and Graham lands, Ellsworth block and Marie Byrd Land depocenters (Fig. 1). Possible in situ sources have not been reported; however, the East Antarctic scenario is dominated by the Ross orogeny, which is an analog of the Pampean orogeny that generated the emplacement of the igneous belt continuum in the Transantarctic Mountains. In South Africa, the sedimentary sequences show peaks with ages contemporaneous with the Pampean/Ross orogeny (Early Cambrian), however the source of provenance has been much debated for several decades. The calc-alkaline metaluminous to peraluminous S, A, and I-type rocks outcropping in the southwestern part of Africa correspond to the youngest possible in-situ igneous sources (of ca. 510 to 550 Ma) and can probably be considered as a potential source for the Paleozoic sequences. Similarly, for the Malvinas/Falkland Plateau no in situ ages of contemporaneous sources are present although peak ages contemporaneous with the discussed orogeny have been reported for the Malvinas/Falkland Islands. Particularly, the Cape Basin depocenter has been correlated with sequences of Malvinas/Falkland Islands, Río de la Plata (38°S) and Sierra Grande in Patagonia (41°S) (Tankard et al. 2009). An intrinsic correlation between the underlying Neoproterozoic-Cambrian metasedimentary and igneous rocks from southwestern Kalahari Craton is considered as a possible source to Cape Basin (Fourie et al. 2011).

Contemporaneous and equivalent metasedimentary sequences cropping out in the southeast of Río de la Plata Craton and Patagonia have been recognized (e.g., Rozendaal et al., 1999; Scheepers and Armstrong 2002; Rapela et al., 2003, 2007; Pankhurst et al., 2003, 2006; Oyhançabal et al., 2011). In northern Patagonia, the Sierra Grande Formation, unconformably overlies the basement, with a maximum depositional age of ca. 428 Ma (Uriz et al. 2011), besides it is coherent with the Malvinokaffric fauna of brachiopods and trilobites from lower Silurian to Lower Devonian age (cf. Limarino et al. 1999). The Malvinokaffric fauna is also registered in Cabo Blanco basin in the northeast portion of the Deseado Massif, suggesting similar characteristics of Sierra Grande and the Devonian quartzites of the Malvinas/Falkland Islands (Ramos and Naipauer, 2014).

The **Famatinian Orogeny** has been well-documented along central-south of South America though a continuous batholith from, at least, 20°S to 40°S, with a classical southernmost extension in La Pampa Province (cf. Rapalini et al. 2013). On North Patagonian Massif, the existence of the early stages of the Famatinian magmatic arc have been interpreted from granodioritic orthogneiss of Mina Gonzalito Complex (ca. 492±5 Ma; Varela et al. 2011), southern Yaminué Complex (ca. 467±7 Ma; Rapalini et al. 2013), El Molino pluton (ca. 472±5 Ma; González et al. 2008) as well as some isolated intrusive bodies (ca. 476 Ma; Pankhurst et al. 2006). Amphibolite metamorphic facies Famatinian orogeny-related (ca. 472 Ma) has been inferred from zircon of the gneiss of Mina Gonzalito (Pankhurst et al. 2001, 2006). Amphibolite-grade metamorphism from quartz-feldspathic gneiss dated a metamorphic event contemporaneous with magmatic activity ca. 470 (Pankhurst et al. 2006). In the Deseado Massif scarce magmatic activity has also been reported, the Famatinian magmatic arc could be represented by isolated granitoid bodies with volcanic arc-affinities by Dos Hermanos leucogranite (ca. 450 Ma; Pankhurst et al. 2003), El Sacrificio Granite (ca. 429-425 Ma; Pankhurst et al. 2004, 2006). Subsequently, the **latest stages of the Famatinian Orogeny** were concentrated on the western North Patagonian Massif and are particularly represented by Silurian to Devonian magmatic activity that has been documented in this region. Varela et al. (2005) on the northwestern edge reports an orthogneiss and leucogranite of the Mamil Choique Formation that yielded ages of 425±28 Ma and 387±5 Ma, respectively. Similarity, quasi-contemporary plutonism is reported by the San Martín Tonalite (ca. 419-401 Ma; Varela et al. 2005; Hervé et al. 2013), Cerro Churruinca Tonalite that yield an age of 390±5 Ma (Varela et al. 2005). The continuity of the magmatic belt to southern is well-documented by Lago Lolog Granite, Cáceres Granite and Colán Conhué Granite dated ranging between 395 to 371 Ma (Pankhurst et al. 2006), El Laurel tonalite (395±4 Ma; Pankhurst et al. 2003) and Bahía Laura Granite (393±2 Ma; Guido et al. 2005). The metaluminous and peraluminous granodiorites of Bahía Laura have been interpreted as part of a magmatic arc (Guido et al. 2004) as well as the extension of the Ordovician-Silurian Famatinian magmatic arc (Ramos and Naipauer, 2014), whereas metabasalts have tholeiitic affinities related with primitive island arc (Guido et al. 2005). The hypothesis of a continuous magmatic arc emplaced along Gondwana west of the Pampean arc is quite accepted, and although it lacks extensive records towards the southern portions, it has even been extended to western Antarctica. On the western slope of the Patagonian Andes Hervé et al. (2016) reported metaluminous Devonian intrusive rocks interpreted as the remnants of an island arc (Chaitenia).

The eastern sequences of Patagonia exhibit a similar detrital zircon pattern in the probability density plot that those found on the South African border (e.g., Cape Fold Belt). Particularly, the Cape Supergroup in Africa has Ordovician-Devonian detrital zircon populations suggest the presence of a contemporary source that supplied materials to the Cape Basin (Thamm and Johnson, 2006). However, along the Kalahari Craton or Namaqua Natal Complex, no potential Ordovician-Devonian sources have been recorded, opening the debate on the provenance of detrital zircons. Classically, a potential candidate source corresponds to the Famatinian arc, which is well documented along NW Argentina (Ramos, 2008; Otamendi et al. 2021). During the last decades, Ordovician-Devonian igneous bodies have been reported in the North Patagonian Massif (Pankhurst et al. 2006; Rapalini et al. 2013), the Deseado Massif (Pankhurst et al. 2003; Guido et al. 2005), and in West Antarctica (e.g. Millar et al. 2002; Riley et al. 2012). In this scenario, it could be considered that the Ordovician-Devonian intrusives of West Antarctica and Patagonia could represent the Famatinian magmatic arc, which was at that time closer to the Cape Basin, explaining the detrital population pattern in the Cape Supergroup.

Finally, the Gondwana orogeny that took place after the Famatinian orogeny has been largely associated with the collision of the Patagonia block and/or Deseado Massif against the Rio de la Plata Craton, and, consequently, would be responsible for imprinting the tectonic style of the sedimentary sequences of southern Rio de la Plata and Patagonia and South Africa. However, during the last time, the hypothesis of the collision of the Antarctic Peninsula against the southern part of Patagonia has been postulated (e.g., Pankhurst et al. 2006; Suarez et al., 2019; Rojo et al. 2021). In this context, important detrital zircon peaks are recorded in the sedimentary and metasedimentary sequences for southwestern Gondwana for the late Paleozoic. One of the major questions is the source of the sediments for the late Paleozoic, as there are no good in situ reports within the Deseado Massif, Tierra del Fuego and southern Africa. However, the marked Gondwana peak could be related to an arc jump towards the southwestern periphery of Gondwana, being emplaced on the Antarctic Peninsula prior to and during the accretion of the latter with Patagonia.

Review of the tectonic models, as well as the stratigraphic, paleontological, geochemical, and geochronological information from the southwestern segment of Gondwana, support the idea that the tectonic setting of the southwestern Gondwana from Late Neoproterozoic to Late Paleozoic was controlled fundamentally by an accretionary margin.

Keywords: Gondwana; Patagonia, Patagonia, Terra Australis Orogen, Antarctic Peninsula.

References:

- Cawood, P. A. 2005. *Earth-Science Reviews*, 69, 249–279.
- Fourie, H. et al., 2011. *Int J Earth Sci.* González, P.D., et al., 2008. .6th South American Symposium on Isotope Geology, S. C. de Bariloche.
- Guido, D. et al., 2004. *Journal of South American Earth Sciences* 16, 567e577.
- Hervé, F., et al., 2003. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 107-123.
- Hervé, F., et al. E. 2013. *Gondwana Research*, 23, 1122–1135.
- Limarino, C.O. et al., 1999. Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29, Buenos Aires, 319–347.
- Millar, 2002. *J. Geol. Soc. London*. 159, 145–157.
- Otamendi, J.E. et al., 2020. *J. S. Am. Earth Sci.* 100, 102558.
- Oriolo, S. et al., 2019. *Tectonics*. Oyhantcaval P., et al. 2010. *J. Earth Sci.*
- Pankhurst, R. et al., 2006. *Earth Sci Rev* 76:235–257.
- Rapalini A.E. et al., 2013. *Terra Nova* 25:337–342. doi:10.1111/ter.12043.
- Ramos, V.A., 1984. 9° Congreso Geológico Argentino 2, 311-325. San Carlos de Bariloche.
- Ramos, V.A., Naipauer, M., 2014. *J. Iber. Geol.* 40, 2, 367–379.
- Rapalini A.E., 2013. *Terra Nova* 25:337–342.
- Rapela, C.W. et al., 2003. *Journal of the Geological Society, London*, 160, 613–628.
- Riley, T.R., et al., 2012. *J. Geol. Soc.* 169 (4), 381–393.
- Rojo, D. et al., 2021. *J South Am Earth Sci.*
- Rozendaal A, et al. 1999. *Precamb Res* 97:303–323.
- Scheepers R. and Armstrong R. 2002. *South African Journal of Geology* 105:241–256.
- Suárez, R.J. et al., 2019. *J South Am Earth Sci.*
- Suárez, R.J. et al., 2020. *J. S. Am. Earth Sci.* 95, 102256.
- Tankard A., et al., 2009. *Mar Petrol Geol* 26:1379–1412.
- Thamm, A.G., Johnson, M.R. 2006. *Geological Society of South Africa and Council for Geoscience*, 443–460.
- Uriz, N.J. et al. *International Journal of Earth Sciences* 100, 571–589.
- Varela, R. 2005. *Revista Geológica de Chile*.

Late Neogene terrestrial climate reconstruction of the Central Namib Desert. U-Pb silcrete and TCN exposure dating

Richard Albert², Benedikt Ritter¹, Aleksandr Rakipov², Tibor J. Dunai¹, Axel Gerdes²

(1) University of Cologne, Institute of Geology & Mineralogy, Germany

(2) Goethe-University Frankfurt, Frankfurt Isotope and Element Research Center (FIERCE), Germany

The chronology of the Cenozoic, so called 'Namib Group' of the Namib Desert is rather poor in terms of direct radiometric dating. Most of the chronological information is based on the ostrich shell biochronostratigraphy. The widespread occurrence of calcretes and silcretes in the Namib Desert makes it possible to date important phases of landscape stability and to retrieve critical paleoclimatic and -environmental information on desertification and its paleoclimatic variability. The application of the U-Pb laser ablation dating technique to Plio/Pleistocene sil- and calcretes provides critical insights into groundwater calcrete formation and climate variability in the Central Namib. Microscale silcrete formation due to pressure solution by expanding calcrete cementation provides the opportunity to date multiple phases (multiple generation of silcrete as growing layers or shells) of silcrete formation and to trace their paleoclimatic and -environmental fingerprints. Groundwater sil- and calcrete formation occurred during the Pliocene. TCN exposure ages from flat canyon rim surfaces indicate the cessation of groundwater calcrete formation due to incision during the Late Pliocene/Early Pleistocene and mark a large-scale landscape rejuvenation due to climate shifts towards the Pleistocene. This study demonstrates the application of U-Pb laser ablation to groundwater sil- and calcretes in desert environments and opens up the possibility of dating numerous sedimentary sequences containing sil- and calcretes in arid environments. In particular, the use of silcretes (as described above) reduces potential effects of detrital components and bulk-signal measurements by using massive calcretes. Our study redefines and improves the generally accepted Late Cenozoic chronostratigraphy of the Namib Desert (Miller, 2008).

Keywords: LA-ICP-MS, U-Pb, TCN exposure dating, Namib Desert, Climate.

References:

- Miller, R.: The Geology of Namibia, Ministry of Mines and Energy - Geological Survey Namibia, 3, 25-21, 2008.

3D inversion of loop source transient electromagnetic data for sedimentary sequences in the Atacama Desert, Chile

Bárbara Blanco Arrué¹⁻², Pritam Yogeshwar², Bülent Tezkan², Yajun Liu⁴, Ronghua Peng⁵, Volker Wennrich³

- (1) Leibniz Institute for Applied Geophysics, Geoelectrics & Electromagnetics, Stilleweg 2, 30655, Hannover, Alemania
 (2) University of Cologne, Institute of Geophysics and Meteorology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Pohligstrasse 3, 50969, Colonia, Alemania
 (3) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Zùlpicher Str.49a, 50674, Colonia, Alemania
 (4) University of Geoscience, Badong National Observation and research station of Geohazards, 430074, Wuhan, China
 (5) University of Geosciences, School of Geophysics and Geomatics, 430074, Wuhan, China

The Atacama Desert along the Chilean Coastal Cordillera is a unique landscape to understand the evolution of the Earth in hyper-arid and arid environments. Sedimentary deposits in endorheic basins, such as clay pans, are crucial to understanding the surface and subsurface processes in areas limited by water availability. The investigated site, the Paranal clay pan, is a study area of the collaborative research center, *CRC 1211- Earth evolution at the dry limit*, established at the University of Cologne, Bonn, and Aachen. In the last decade, the need for better comprehension of the paleoclimate has turned applied geophysics, particularly electromagnetic methods, into relevant tools for interdisciplinary research.

This work aims to provide the sedimentary architecture and bedrock topography of a selected clay pan through multidimensional inversion and interpretation of loop source transient electromagnetic (TEM) data. The Paranal clay pan, located in the Pampa Remiendos near Armazones Hill (Antofagasta Region), has been intensively studied by the *CRC 1211* project to recover a widely continuous climate record from the Coastal Cordillera. In addition, the sediment body of this clay pan presumably dates back to the onset of hyper-aridity in the Mio-Pliocene, making it a key site for paleoclimate investigations. Within the subproject, other geophysical techniques, such as active seismic and magnetics, were also carried out, complementing the geoscientific investigation, and providing an interpretation of the internal structure based on other physical properties. Moreover, the presented geophysical investigation provided foundations to derive suitable drilling locations for paleoclimatic research, ensuring reliable results for the costly drilling campaigns within the project.

The TEM method is an active electromagnetic method and is also inductive because it relies on the induction processes generated by the transmitting loop (Nabighian & Macnae, 1991). First, the transmitter loop is placed on a surface with a current flowing. This sets up a primary magnetic field which, when switched off, induces Eddy currents that flow in a closed trajectory, changing deepness and sides, and decreasing its intensity through time. These current interruptions cause a secondary transitory magnetic field, which decreases through the subsurface and can be detected by a receiver loop as a time-dependent decaying voltage or the so-called transients. Based on this, the TEM method is sensitive to finding conductive layers on which the transients are related to the electrical conductivity of the subsurface material. In addition, it is non-invasive and has a fast deployment, making it suitable to work in challenging conditions expected in this hilly environment.

A total of 133 TEM soundings were carried out on a 3D grid in the Paranal clay pan in two different surveys, November 2018 and December 2019 (see Figure 1a). The TEM soundings were carried out using a central loop configuration, in which a transmitter loop size of 40×40 m² and a receiver of about 10×10 m² were used. In addition, a transmitter loop size of 80×80 m² was utilized, using the same receiver in some stations as reference points. The TEM data were processed and analyzed, exhibiting high-quality data. In order to select a considerable data time length, a robust stacking and joint procedure between the Low and High moments was performed. Additionally, noise measurements at each sounding location were collected. Then, on each transient, the TEM data was selected until it reached the noise level threshold, on which the Paranal site has an average noise level of about $\eta_{\text{noi}} = 3 \cdot 10^{-10}$ V/Am². Once the processing was done, the *EMU+* algorithm provided by the University of Cologne was used to derive a 1D inversion of each sounding using conventional approaches such as Marquardt-Levenberg and Occam (Scholl, 2005).

Figure 1b illustrates the stitched 1D Occam inversion results along Profile B3, with a clear three-layered resistivity-depth structure. First, a layer with a high resistivity greater than 100 Ω m and roughly 50 m thick is observed. Then, the resistive layer is followed by a second conductive layer of roughly 20 Ω m. Followed up with a more resistive base layer with 200 Ω m. In addition, the uncertainty of the top and bottom depth ranges of the conductive layer is calculated from the equivalent models and shown as a vertical error bar for each model. The resistivity distribution of the clay pan is well-resolved with a global misfit of about $\chi = 1.1$ (see Figure 1c), and the 1D models are consistent among each inversion approach. In this manner, the resistivity characterization down to 250 m depth is reliable based on the obtained Depth Of Investigation (DOI). Based on the 1D inversion results, a maximum sedimentary thickness of 160 ± 10 m is observed, and the shape of the conductive sediments suggests the presence of a former channel that might be part of the main drainage network in the surrounding Pampa Remiendos. The comparison between the TEM-1D profiles and the seismic tomography results is consistent with the transition depth between the different sediment strata, and the magnetic outcome is in good agreement with the geological outcrop of the regional map, validating the basement obtained by the TEM-1D models.

Subsequently, an intensive drill campaign was performed in the Paranal site within the *CRC 1211* project. Here, it reveals key lithology summarized in three main lithology sequences: (a) uppermost 52 m sediments with fine grain size, followed by (b) fluvial conglomerate with large boulders (>1 m) between 52 m and 171 m depth, and (c) weathered granodioritic bedrock below. The drill core results confirm the TEM-1D results of Station T12, at the center of the clay pan, which is in good agreement and highly consistent with the resulting lithology (to the right of Figure 1d). However, it is well known that multidimensional effects can lead to misinterpretations of TEM data if the subsurface is not 1D. In those cases, a 2D resistivity distribution might be influenced (Yogeshwar & Tezkan, 2018). Therefore, in order to validate the TEM-1D models and investigate possible distortion effects, a 2D forward modeling study was performed using the well-tested and established finite difference *SLDMem3t* algorithm (Hördt et al., 1992). The *SLDMem3t* was utilized to model different clay pan scenarios, adapting the slope angle of the conductive layer and their resistivity distributions.

The analyzed scenarios confirm the presence of 2D effects in the Paranal TEM data set, being much stronger at the edges of the transect (Profile B3). Moreover, the 2D forward modeling also exhibits that the depth of the basement of the main transect north-south is slightly underestimated and possibly deeper within a range of about 24 m.

In this manner, a multidimensional algorithm for the subsurface reconstruction is required to better deal with the observed 2D distortions in the TEM data. Software to perform 2D/3D TEM modeling/inversion is scarce, so developing new algorithms is still an ongoing research area. Here, aiming to derive a more accurate geometry of the Paranal clay pan, the recently developed Julia Package for 3D inversion and modeling code is performed (Peng et al., 2016; Liu et al., 2019). The 3D algorithm code is suitable for the time domain. It is based on 3D Finite-Volume and uses a Gauss-Newton inversion scheme coupled with a preconditioned conjugate gradient method to avoid explicit Jacobian calculation in each iteration. Since the code is implemented for 3D, a very large smoothing in the y-direction is used to force a 2D subsurface reconstruction. The 2D and 3D synthetic studies reflected a high computational cost required for such processes to obtain suitable 2D model parametrization and accurate results for the proposed subsurface structure. Consequently, the 3D inversions were executed on the Institute of Geophysics and Meteorology server at the University of Cologne using AMD EPYC 7763 CPUs with 64 cores each and 4TB of RAM.

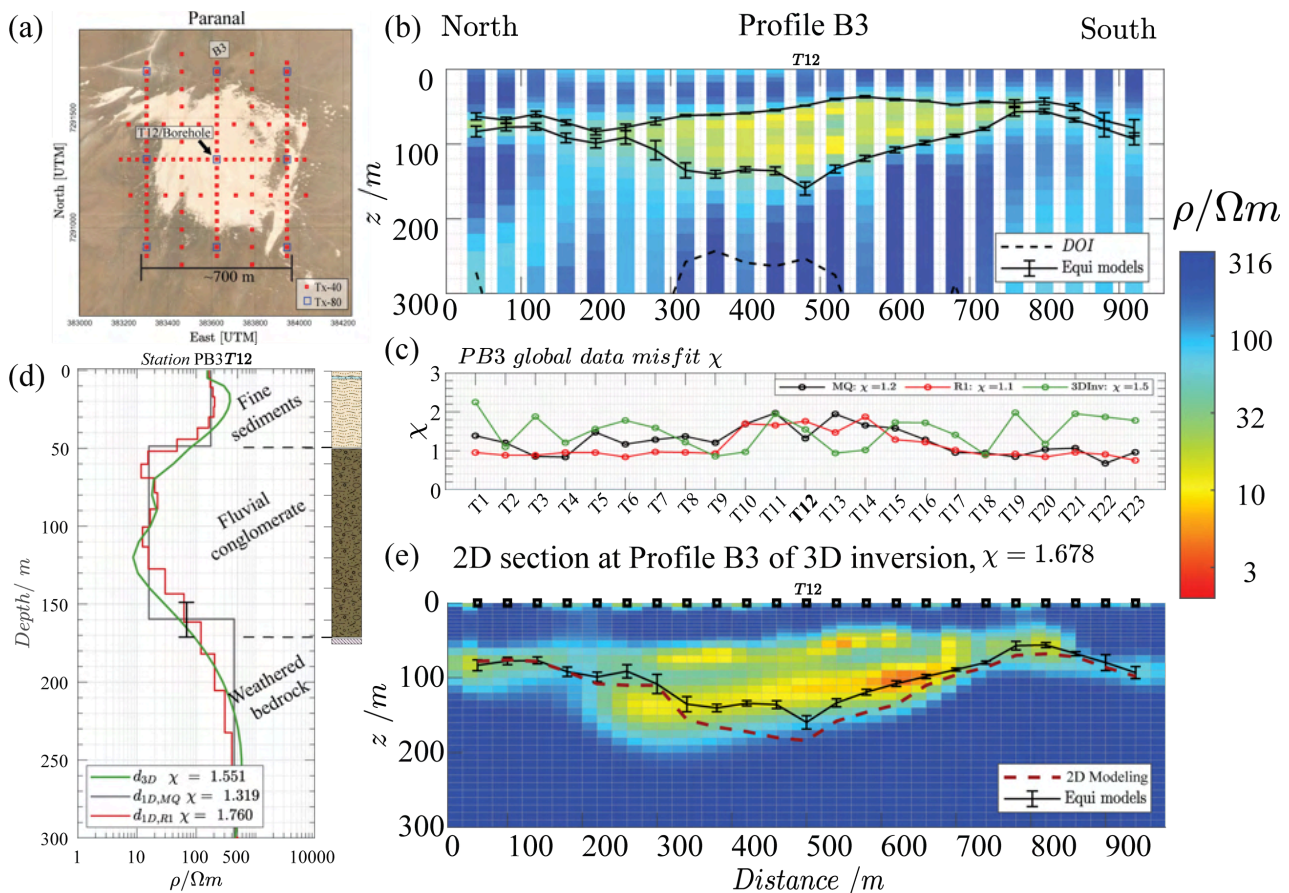


Figure 1. (a) Geophysical survey layout. The TEM soundings in red and blue squares correspond to the 40×40 m² and 80×80 m² setup, respectively. The Station T12 and the borehole are highlighted at the center. Map data: ESRI satellite image. (b) 1D stitched inversion results using Occam R1 models for Profile B3. The DOI is plotted as a black dashed line. The top and bottom depth ranges of the conductive layer obtained by the equivalent models are displayed as error bars. (c) Global data misfit χ along the profile B3 for each inversion approach. (d) Comparison between the 1D models Marquardt and Occam and the resistivity distribution of the obtained 3D inversion at Station T12. The core lithology is displayed to the right. (e) 2D section of the 3D inversion at Profile B3. The depth of the basement obtained by the 1D equivalent models are displayed as error bars. Black squares denote the source positions. Red dashed lines indicate the depth of the basement derived by the 2D forward modeling study.

Then, the 3D inversion of the whole Paranal TEM data set was performed utilizing proper smoothing constraint parameters based on the 3D synthetic studies and the spacing of the acquired TEM soundings locations. The 3D inversion presents a high convergence rate, and acceptable solutions can be obtained after ten iterations with a good misfit of about $\chi=1.6$ with 133 stations. However, the misfit values obtained in the stations to the edges of the B3 profile show certain mismatches, being greater than those obtained by the 1D inversion (see Figure 1c). These mismatches will be carefully analyzed in terms of the TEM data length of each type of inversion and will take part in the discussion and results in this contribution. Extracting the 1D resistivity depth at Station T12 from the 3D inversion result and comparing it with its 1D inversion, it can be seen a maximum thickness of around 170 m depth that is consistent with the borehole and lithology information (see Figure 1d). In general, the 3D model exhibits a well-resolved geometry of the clay pan, with a high resolution of the derived conductive body. The 2D section at profile B3 of the 3D inversion result is shown in Figure 1e.

The comparison between the bottom depth of the conductor obtained by the 1D inversion models and the geometry derived by the 3D inversion exhibits some mismatches, especially at the edges around $x = 250$ m (black line in Figure 1e). These results validate the presence of a 2D structure and show that the 1D inversion results were affected by distortion effects due to the real geometry of the clay pan. Furthermore, this is also confirmed by the 2D forward modeling study using profile PB3 (red dashed line in Figure 1e), for which a 2D model with a larger bottom depth of the conductive layer and an equal resistivity distribution for the basement could fit the data better.

Conclusively, the effects of the slopes and lateral variations are included in the 3D inversion, and the resulting models are a more reliable and realistic representation of the geometry of the clay pan than the ones derived from the 1D models. The results presented are a basis for future investigations using electromagnetic methods within the CRC 1211 project in the Coastal Cordillera of the Atacama Desert, northern Chile. The derived subsurface models provide a detailed image of the resistivity depth distribution of the Paranal clay pan. The geometry of the conductive sedimentary sequences is detected, and the thickness is spatially derived on each site. These results agree with the local and regional geological context, improving the understanding of sediment deposition and transportation in this hilly and arid environment exposed to different aridity, fluvial and pluvial periods.

Keywords: Transient electromagnetic method, 3D inversion, Sedimentary sequences, Resistivity, Electrical conductivity.

Financing: This project was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB-1211 – 268236062. We appreciate the support by the National Agency for Research and Development (ANID)/Scholarship Program/DOCTORADO BECAS CHILE-DAAD/2018 - 62170003, and DAAD (No. 57395809). We appreciate the DESMEX-II project, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant 033R130CN, to provide the Occam server of the Applied Geophysics working group.

Acknowledgments: We are grateful for all the support of the seismic equipment provided by the Geophysical Instrument Pool Potsdam, and the TEM device provided by the Department of Geophysics, University of Chile.

References:

- Blanco-Arrué, B., Yogeshwar, P., Tezkan, B., Mörbe, W., Díaz, D., Farah, B., Buske, S., Ninneman, L., Domagala, J., and Diederich-Leicher, J. (2022). Exploration of sedimentary deposits in the Atacama Desert, Chile, using integrated geophysical techniques. *Journal of South American Earth Sciences*, p. 103746. ISSN 0895-9811.
- Liu, Y., Hu, X., Peng, R., & Yogeshwar, P. (2019). 3D forward modeling and analysis of the loop-source transient electromagnetic method based on the finite-volume method for an arbitrarily anisotropic medium. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(5), 1954-1968.
- Yogeshwar, P. and Tezkan, B. (2018). Analysing two-dimensional effects in central loop transient electromagnetic sounding data using a semi-synthetic tipper approach. *Geophysical Prospecting*, 66(2): 444–456. ISSN 1365-2478.
- Peng, R. H., Hu, X. Y., Han, B., & Cai, J. C. (2016). 3D frequency-domain CSEM forward modeling based on the mimetic finite-volume method. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10), 3927-3939.
- Scholl, C. (2005). The influence of multidimensional structures on the interpretation of LOTEM data with one-dimensional models and the application to data from Israel (Doctoral dissertation, Universität Zu Köln).
- Nabighian, M. N., & Macnae, J. C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. In *Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B* (pp. 427-520). Society of Exploration Geophysicists.

Influence of two native plants on soils in the hyper core of the Atacama Desert

Alessandra Choque¹⁻², Bárbara Fuentes¹, Juan Castro Severyn¹⁻³, Jonathan Fortt¹⁻², Rodrigo Riquelme², Roland Bol⁴,
 Ramona Mörlen⁵, Francisco Remonsellez¹⁻³

- (1) Universidad Católica del Norte, Ingeniería Química y Medio Ambiente, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (3) Universidad Católica del Norte, Centro de Investigación Tecnológica del Agua y Sustentabilidad en el Desierto CEITSAZA, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (4) Forschungszentrum Jülich GmbH, Agrosphere (IBG-3), Institute of Bio- and Geosciences, Wilhelm-Johnen-Straße 52428, Jülich, Germany
 (5) University of Bonn, Soil Science and Soil Ecology, Institute of Crop Science and Resource Conservation (INRES), Nussallee 13, Bonn, Germany

The extreme hyperarid core of the Atacama Desert located between parallels 22°S and 26°S (Houston and Hartley, 2003; McKay et al., 2003; Crits-Christoph et al., 2013) is known as the driest places on Earth (Dunai et al., 2005; Evenstar et al., 2017). The Yungay area where precipitation is less than 2 millimeters per year (Houston and Hartley, 2003; McKay et al., 2003; Crits-Christoph et al., 2013), it has been described as one of the most hostile places for life on Earth (Navarro-Gonzalez, 2003). Since, this place has served as model system for life in extreme environments, many investigators focus in the detection of fingerprints and microbial life in bare soils (eg. Lester et al., 2007; Crits-Christoph et al., 2013; Ziolkowski et al., 2013; Mörlen et al., 2019; Azua-Bustos et al., 2022; Fuentes et al., 2022). Near Yungay, an oasis can be found (Fletcher et al., 2012), here it is possible to find patches of salt-bushes (*Suaeda foliosa*) and salt-grass (*Distichlis spicata*), that fed on and are clustered near brackish groundwater (Ingendesa, 1997; Marquet et al., 1998; Fletcher et al., 2012; Pfeiffer et al., 2018). We investigate the horizontal and vertical influence of these plants in the physical, chemical, biological and mineralogical features of the hyperarid soil. Our results showed, horizontally and vertically, soil acidification due both type of plants compare to control soil and indicated horizontal changes in total nitrogen and also variations in the electrical conductivity in *S. foliosa* soils. The 16S sequencing results demonstrated similar bacterial phyla between *D. spicata* and control soils, i.e. Halobacterias and Firmicutes, while *S. foliosa* showed major abundance in Firmicutes and Proteobacteria. Microbial data also indicated horizontal and vertical abundance differences, i.e., horizontally *S. foliosa* was dominated by members of the family Morganellaceae, and Enterococcaceae, which decreases as it moves away from the plant, while vertically was predominated by Planococcaceae, whereas Haloferacaceae was present in *D. spicata* and control soils. Moreover, from the total of our data, a 66.81% could be assigned taxonomy until genus level. Finally, DRX and SEM analyses showed different types of carbonates and clays associated with soil related to plants and control soils. We concluded that even under extreme conditions plants give signs that they are able to display changes on soils, and are capable of supporting extreme microbial communities. In addition, conducting research in this kind of environment could be a contribution in determining thresholds of biotic and abiotic factors that control life in the hyper arid core of the Atacama Desert.

Keywords: Atacama Desert, hyperarid soil, plant influence, extreme microbial communities.

Financing: ANID- National Doctoral Fellowship N° 21200594ANID-FONDECYT REGULAR N° 12202902.

Acknowledgments: CRC-1211 ProjectANID-MEC 80180018ANID- MEC 80190012FE-SEM SU5000-MAINI@ UCN 2018.

References:

- Azua-Bustos A, González-Silva C and Fairén AG (2022) The Atacama Desert in Northern Chile as an Analog Model of Mars. *Front. Astron. Space Sci.* 8:810426.
- Crits-Christoph, A., Robinson, C.K., Barnum, T. et al. (2013). Colonization patterns of soil microbial communities in the Atacama Desert. *Microbiome* 1, 28.
- Dunai, T. J., González López, G. A., & Juez-Larré, J. (2005). Oligocene–Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33(4), 321.
- Evenstar L.A., Mather A.E., Hartley A.J., Stuart F.M., Sparks R.S.J., Cooper F.J. (2017). Geomorphology on geologic timescales: Evolution of the late Cenozoic Pacific paleosurface in Northern Chile and Southern Peru. *Earth Sci. Rev.*, 171, 1-27.
- Fletcher, L. E., Valdivia-Silva, J. E., Perez-Montañón, S., Condori-Apaza, R. M., Conley, C. A., McKay, C. P. (2012). Variability of organic material in surface horizons of the hyper-arid Mars-like soils of the Atacama Desert. *Advances in Space Research*, 49(2), 271–279.
- Fuentes B, Choque A, Gómez F, Alarcón J, Castro-Nallar E, Arenas F, Contreras D, Mörlen R, Amelung W, Knief C, Moradi G, Klumpp E, Saavedra CP, Prietzel J, Klysibun W, Remonsellez F and Bol R (2022) Influence of Physical-Chemical Soil Parameters on Microbiota Composition and Diversity in a Deep Hyperarid Core of the Atacama Desert. *Front. Microbiol.* 12:794743.
- Mörlen, R., Lehdorff, E., Arenas-Díaz, F., Moradi, G., Bol, R., Fuentes, B., et al. (2019). Carbon accrual in the Atacama Desert. *Global Planet. Change* 181:102993.
- Pfeiffer, M., Latorre, C., Santoro, C. M., Gayo, et al. (2018). Chronology, stratigraphy and hydrological modelling of extensive wetlands and paleolakes in the hyperarid core of the Atacama Desert during the late quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 197, 224-245.
- Ziolkowski LA, Wierzbos J, Davila AF, Slater GF. (2013). Radiocarbon evidence for active endolithic microbial communities in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology* 13:607–16.

Earth – Evolution at the dry limit

Tibor J. Dunai¹, Christine Heim¹, Martin Melles¹, Dietmar Quandt², Tony Reimann¹

(1) University of Cologne, Geosciences, Natural Sciences, Cologne, Germany

(2) Bonn University, Nees Institute for Biodiversity of Plants, Natural Sciences, Bonn, Germany

Water is the defining feature of the habitable Earth; it is essential for all life as we know it. Evolution of life in extremely water limited environments, which cover significant portions of the Earth, is not well understood. Akin to life, water-driven processes leave unique marks on the Earth's surface. Mars is the only other planet known to bear the marks of water-driven surface processes, albeit fossil and of great age. The slow surface processes that may operate even in the virtual absence of liquid water are essentially unknown. What is evident is that transient episodes of increased water availability leave long lasting traces in extremely water limited environments. Intriguingly, those traces of bursts in Earth surface evolution have rarely been related to bursts in biological colonization/evolution, and vice versa, although both relate to the same trigger: water.

The aim of the Collaborative Research Centre (CRC) 1211 (<http://sfb1211.uni-koeln.de/>), which involves twenty projects at the Universities of Cologne, Bonn and Aachen, and partner institutions in Chile (UCN Antofagasta; Univ. Antofagasta; Univ. Austral., Univ. Concepcion, UCSS, CEAZA, La Serena; PUC Santiago; SERNAGEOMIN) and Namibia (UNAM, NBRI; Gobabeb Namib Res. Inst.), is to investigate the mutual evolutionary relationships between Earth surface processes and biota. The target areas are arid to hyper-arid systems, where both biota and Earth surface processes are severely and predominantly limited by water availability. The research, which has been carried out in two funding phases since 2016, is mainly focused on the Atacama and the Namib Desert. We are currently working on a third funding phase (7/2024 - 6/2028) and are open to collaborations.

Primary research aims are to isolate the key fingerprints of biological activity at the (water) limit of the habitable Earth, and to characterize the Earth surface processes operating in the (virtual) absence of liquid water. We aim to characterize thresholds for biological colonization and concurrent fluvial transformation of landscapes, the tipping point(s) of biotically and abiotically controlled Earth surface systems, and to establish detailed long-term terrestrial climatic records of the oldest and most arid zones on Earth. Chronometric and spatial information on the colonization and radiation of biota will be related to the landscape evolution and their common driver: climate.

Keywords: surface processes, evolution, arid zone geomorphology, geochronology.

Financing: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Project number 268236062.

Understanding a complex ecosystem: Tillandsiales in the hyperarid core of the Chilean Atacama Desert

Marcus Koch¹, Dietmar Quandt², CRC1211 Tillandsia consortium³

(1) Heidelberg University, Centre for Organismal Studies (COS), Im Neuenheimer Feld 345, Heidelberg, Germany

(2) Bonn University, NEES Institute, Bonn, Germany

(3) CRC1211, Bonn, Cologne, Gatersleben, Heidelberg, La Serena, Germany/Chile

Tillandsia landbeckii is a "core species" in the hyper arid parts of the Atacama Desert which is colonized by few vascular plants only. Totally dependent on fog occurrence as the most important source of water, *Tillandsia landbeckii* is a key element of the most prominent vegetation type, the Lomas of the hyperarid Chilean Atacama core. Epiarenic growth, lacking any root system, evolved five times independently in the genus *Tillandsia* during the past 5 my in the Peruvian-Chilean Desert system and lay the ground to build up unique ecosystems, with *Tillandsia purpurea* representing the Peruvian vicariant species. The onset of this parallel evolution may be considered as a temporal land-mark for those fog-dependent ecosystems of the hyperarid core Atacama. Footprints of evolutionary diversification of present-day gene pools of *T. landbeckii* go back roughly 500,000 years, and present-day biogeographic distribution pattern is mostly shaped due to environmental changes since 22,000 years ago during the Last Glacial Maximum (LGM). The genetic set-up is surprisingly characterized by ancestral gene pools, "frozen" hybrid genotypes and clonal propagation and dispersal. ***This observation feeds into our hypothesis that phenotypic plasticity contributing to plant fitness and survival in space and time is limited on individual level, but on population-level it is compensated by a landscape-level mixture of different "frozen" geno- and phenotypes, thereby allowing rapidly to cope with environmental change at the extreme limits of parameters affecting plants' life.*** A multi-disciplinary approach combining approaches from different disciplines (plant biology, evolutionary biology, microbiology, climatology, geology, geomorphology and remote sensing technology) aims to unravel the complex interplay of biotic and abiotic factors to elaborate on our understanding of life occurring at the limits of growth due to the lack of water. We introduce the complex phylogeographic history of the species in Chile and introduce a mechanistic/biological growth model exploring environmental - biotic and abiotic - parameters. For comparative analysis on metapopulation level three region have been selected (North near Arica, Centre near Iquique, South near Caldera) for detailed comparative insitu and ex-situ analyses.

***CRC1211 Tillandsia consortium** in alphabetical order: Georg Bareth, Julia Bechteler, Christoph Böhm, Olaf Bubenzer, Dörte Harpke, Andrea Jäschke, Christiane Kiefer, Claudia Knief, Sarina Jabbusch, Matthias May, Felix Merklinger, Paloma Morales, Johanna Möbus, Carsten Münker, Janet Rethemeyer, Toni Reimann, Jan Schween, Alexander Siegmund, Michael Staubwasser, Eric Stein, Alexandra Stoll, Marijn van der Meij.

Keywords: evolutionary history, environmental change, Tillandsiales.

Financing: This study was funded by the German Research Foundation (DFG) – Project: INST 216/860 – SFB 1211 (<http://sfb1211.uni-koeln.de/>).CRC: Evolution at the dry limit.

Acknowledgments: We acknowledge collaboration with: F. Villasante Benavides, C. Luque Fernandez, G.A. Pauca-Tanco (Peru) and C. del Río, C. Latorre, J.-L. García, P. Osses, F. Alfaro, S. Abades (Chile).

References:

- Stein, E. et al., 2023. Climate-driven past and present interspecies geneflow may have shaped microscale adaptation capacity in tillandsia lomas in hyperarid South American desert systems. *Global and Planetary Change* (in review).
- Koch, M. et al., 2022. Range expansion and contraction of *Tillandsia landbeckii* lomas in the hyperarid Chilean Atacama Desert indicates ancient introgression and geneflow. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 56 (125689), 1 - 14.
- Koch, M. et al., 2022. Living at its dry limits: Tillandsiales in the Atacama Desert. *Plant Systematics and Evolution*. 308 (11), 1 – 3.
- del Río, C. et al., 2021. Spatial distribution and interannual variability of coastal fog and low clouds cover in the hyperarid Atacama Desert and implications for past and present *Tillandsia landbeckii* ecosystems. *Plant Systematics and Evolution*. 307 (58), 1 - 23.
- García, J.-L. et al., 2021. Climate and coastal low-cloud dynamic in the hyperarid Atacama fog Desert and the geographic distribution of *Tillandsia landbeckii* (Bromeliaceae) dune ecosystems. *Plant Systematics and Evolution*. 307 (57), 1 - 22.
- Koch, M. et al., 2021. Vegetation growth and landscape genetics of *Tillandsia* lomas at their dry limits in the Atacama Desert show fine-scale response to environmental parameters. *Ecology and Evolution*. 10, 1 - 15.
- Merklinger, F. F. et al., 2021. Population genomics of *Tillandsia landbeckii* reveals unbalanced genetic diversity and founder effects in the Atacama Desert. *Global and Planetary Change*. 184, 1 - 11. [DOI:10.1016/j.gloplacha.2019.103076](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103076).
- Möbus, J. et al., 2021. Setting the evolutionary timeline: *Tillandsia landbeckii* in the Chilean Atacama Desert. *Plant Systematics and Evolution*. 307 (3), 1 - 12.
- Villasante Benavides, F., et al., 2021. Distribution patterns, ecological niche and conservation status of endemic *Tillandsia purpurea* along the Peruvian coast. *Plant Systematics and Evolution*. 307 (52), 1 - 14.

Maturing cutting-edge luminescence-based inventories for measuring vertical upper ECZ particle fluxes and for dating the exposure of typical Atacama Desert soils and surfaces

Linda Maßon¹, Svenja Riedesel¹, Anja Zander¹, Mariana Sontag-González²⁻³, Simon Matthias May¹, Tony Reimann¹

(1) University of Cologne, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Albertus-Magnus-Platz, Cologne, Germany

(2) Justus-Liebig-University, Geography, Mathematics and Computer Science, Physics, Geography, Ludwigstraße 23, Gießen, Germany

(3) Stony Brook University, Department of Geosciences, 100 Nicolls Rd, NY 11794-2100, USA

The central Atacama Desert is generally considered the driest place on Earth. Given the fog-related moisture availability along the north Chilean Coastal Cordillera and the increasing precipitation towards the Andean Cordillera, it is an ideal area to explore the transition of biotically to abiotically driven processes in the Earth's Critical Zone (ECZ). For this purpose, luminescence dating techniques have elsewhere proven to be a powerful tool in the recent past [e.g., Reimann et al., 2017]; nonetheless, a previous study testing the applicability of luminescence dating on coarse grain feldspars from the Atacama Desert found highly variable K-contents (0.67 - 11.17 % K₂O) within each sample and below 1 % of the measured feldspar grains gave a post-infrared infrared stimulated luminescence (pIRIRSL) signal suitable for dating [Zinelabedin et al., 2022].

Single-grain luminescence dating has successfully been applied to infer sediment transport and mixing processes in various geological settings [e.g., Reimann et al., 2017]. However, in some regions, like the Atacama Desert, single-grain luminescence dating can be challenging and time consuming, particularly when only a small percentage of grains emits luminescence. In such cases many individual grains need to be measured before a sufficient number of grains has been obtained to calculate a robust palaeodose. It has been shown that establishing a standardised growth curve (SGC) for single-grain feldspar pIRIRSL measurements reduces the measurement time considerably [Li et al., 2018] and that SGCs are suitable for feldspars with unfavourable luminescence properties and a complex mineralogy [Sontag-González et al., 2021].

Here we test the applicability of SGCs for single-grain pIRIRSL age determination of Atacama Desert feldspars to investigate small-scale geomorphological processes in the Atacama Desert. In addition to five samples from the Atacama Desert, we include five chemically and structurally different feldspar sediment extracts from various geological origins to test the effect of the sample chemistry on SGC behaviour. By performing a dose recovery test (pIRIRSL₁₇₅) on all samples, we gained a test dataset for SGC calculations. To enable a comparison of individual dose response curve behaviour with sample chemistry we constrained the major element chemistry of each grain measured using energy-dispersive x-ray spectroscopy (0.08 – 16.84 % K₂O). We establish three SGCs, one for the entire dataset and either one for Atacama Desert and non-Atacama Desert samples. The SGC performances are tested by applying them to the dose recovery test data of the Atacama Desert samples and comparing the thereby computed equivalent dose (De) estimates to the conventionally calculated De estimates. The successfully refined and established SGC method is applied to samples collected along two climatic transects in the Atacama Desert.

Keywords: potassium feldspar, standardised growth curve, single grain, pIRIRSL, potassium-content.

Financing: This project is affiliated to the Collaborative Research Centre (CRC) 1211 "Earth – Evolution at the Dry Limit" (Grant-No.: 268236062) funded by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG).

References:

- Reimann, T., Román-Sánchez, A., Vanwalleghem, T., Wallinga, J., 2017. Getting a grip on soil reworking – Single-grain feldspar luminescence as a novel tool to quantify soil reworking rates. *Quaternary Geochronology* 42, 1–14.
- Li, B., Roberts, R.G., Jacobs, Z., Roberts, R.G., Li, S.H., 2018. Single-grain dating of potassium-rich feldspar grains: Towards a global standardised growth curve for the post-IR IRSL signal. *Quaternary Geochronology* 45, 23–36.
- Sontag-González, M., Li, B., O'Gorman, K., Sutikna, T., Jatmiko, Jacobs, Z., Roberts, R.G., 2021. Establishing a pIRIR procedure for De determination of composite mineral grains from volcanic terranes: A case study of sediments from Liang Bua, Indonesia. *Quaternary Geochronology* 65, 101181.
- Zinelabedin, A., Riedesel, S., Reimann, T., Ritter, B., Dunai, T.J., 2022. Testing the potential of using coarse-grain feldspars for post-IR IRSL dating of calcium sulphate-wedge growth in the Atacama Desert. *Quaternary Geochronology* 71, 101341.

Significado geomorfológico del Pediplano de Atacama como marcador de la evolución climática y tectónica del antearco Andino, entre 26° y 28° S

Sebastián Muñoz-Farías¹, Benedikt Ritter², Tibor J Dunai², Jorge Morales-Leal¹, Eduardo Campos¹, Richard Spikings³, Rodrigo Riquelme¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Zùlpicher Str. 49b, 50674, Cologne, Germany

(3) University of Geneva, Department of Earth Sciences, 13 Rue des Maraichers, Geneva, Switzerland

Los pediplanos son identificados clásicamente como superficies planas desarrolladas en regiones áridas y con quietud tectónica de larga escala de tiempo, mientras que las incisiones en estas superficies se atribuyen a episodios de alzamiento tectónico. En el Desierto de Atacama, los pediplanos se han utilizado generalmente como marcadores morfo-tectónicos para definir la cronología de los episodios de levantamiento andino durante el Cenozoico tardío, a través de los patrones y tiempos de erosión e incisión. En el segmento sur del Desierto de Atacama, el Pediplano de Atacama se extiende por más de 12.000 km² (entre 26 y 28° Lat. S), a través de la Depresión Central y Precordillera. En este estudio, realizamos un análisis geomorfológico y estratigráfico en el Pediplano de Atacama en el área del cañón del Salado, combinando nuevos resultados geocronológicos derivados de edades de ⁴⁰Ar/³⁹Ar en biotitas de ignimbritas interestratificadas en los depósitos aluviales, y edades de exposición con ²¹Ne cosmogénico en clastos de cuarzos sobre planicies aluviales. Los resultados muestran que la evolución del Pediplano de Atacama fue un proceso continuo de larga-escala de tiempo, que abarcó desde antes de los 20 Ma hasta los ~ 2,3 Ma, y comprendió tanto la depositación aluvial como una subsecuente formación de planicies aluviales desarrolladas por la interacción entre variabilidad climática del Desierto de Atacama y el alzamiento Andino. La depositación del Pediplano de Atacama ocurrió en dos episodios aluviales retrogradantes separados espacial y temporalmente: 1) entre poco antes de los 20.14 Ma y los ~ 9,4 Ma, un lapso de tiempo que permitió además la captura de los drenajes de la Precordillera oriental causando una reorganización del paisaje; y 2) posterior a los ~ 9,4 Ma, con un cambio de la depositación aluvial retrogradante desde la Precordillera hacia la Depresión Central. Esta reubicación ocurrió después del establecimiento del clima hiperárido del Mioceno medio en la Depresión Central y es probablemente consecuencia del alzamiento del Altiplano-Puna. Por su parte, las edades de exposición revelan tanto el fin de la depositación aluvial, como el abandono de las planicies aluviales, entre ~ 5,24 y ~ 3,8 Ma, como consecuencia de la incisión del cañón del Río Salado. Las condiciones climáticas posteriores modularon las superficies aluviales mediante el desarrollo de depósitos de rezago (*lag deposits*), hasta los ~ 2,69 y ~ 2,3 Ma, cuando las condiciones hiperáridas alcanzaron un umbral que logró detener toda actividad superficial. Adicionalmente, una captura de los drenajes de la Precordillera occidental por la incisión retrogradante del cañón del Salado de oeste a este (entre 5,24 a 3,8 Ma), explica la marcada y profunda incisión de este cañón sin la necesidad de un incremento en las tasas de alzamiento de la superficie, ni de un cambio en las condiciones climáticas. Así, se reconoce que el Pediplano de Atacama no es un marcador general de un evento o periodo climático o tectónico singular, sino más bien representa un complejo encadenamiento de eventos de depositación aluvial y formación de planicies aluviales controladas por procesos extrínsecos e intrínsecos que duraron más de ~ 17 ma, trascendiendo así los cambios climáticos y tectónicos de la evolución del antearco Andino durante el Cenozoico tardío.

Palabras Clave: Pediplano, Geocronología, Desierto de Atacama, Geomorfología.

Financiamiento: Beca de Postgrado UCN de la Universidad Católica del Norte y Beca de Doctorado Nacional ANID N°211849. Además, esta investigación contó con el financiamiento y colaboración de los proyectos FONDECYT N°1170992 y N°1220987, Collaborative Research Center (CRC) 1211 (Earth – Evolution at the dry limit) del German Science Foundation (DFG, Alemania), y LMI- COPEDIM (IRD, Francia).

Geochemistry and geomicrobiological relationships in the water-sediment interface at the terrestrial high-altitude Chilean hot-spring: Pampa Lirima

Pablo Paquis¹⁻², Coral Pardo-Esté¹, Joseline Tapia³, Vilma Pérez⁴⁻⁵, July Florez¹⁻⁶, Wade Jeffrey⁷, Martha B. Hengst¹

(1) Departamento de Ciencias Farmacéuticas, Facultad de Ciencias, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(2) Programa de Doctorado en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(3) Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(4) Australian Centre for Ancient DNA, School of Biological Sciences, University of Adelaide, Australia

(5) ARC Centre of Excellence for Australian Biodiversity and Heritage, University of Adelaide, Australia

(6) Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas y HUB Ambiental, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile

(7) Center for Environmental Diagnostics and Bioremediation, University of West Florida, Pensacola, United States

Terrestrial hydrothermal systems are characterised by extreme physical and chemical conditions, representing one of the most poly-extreme environments on Earth. In Chile, a considerable number of geothermal systems have been identified along and across the Central Andean Volcanic Zone. Lirima hot springs are located at 4,000 m a.s.l. in northern Chile. The conditions found in these systems resemble those of early Earth and are linked to global elemental cycle evolution and possess crucial biogeological fingerprints, given the extreme environmental variables and minimal anthropogenic interferences. Here, we aimed to understand the geochemical setting and biogeochemical processes in Lirima that determine the structure of microbial communities by using geochemical, isotopic, and physical and chemical characterization of water and sediment samples. Our results show a predominance of thermophilic microbial communities. In water, the bacterial Phyla *Deinococcus-Thermus* and *Chloroflexi* are among the abundant, while *Actinobacteria* and *Thermotogae* are less abundant. In sediments, the Phyla *Proteobacteria* and *Firmicutes* are among the abundant, while *Deinococcus-Thermus* and *Proteobacteria* are lower represented. We also found archaeal communities related to the *Thaumarchaeota* and *Euryarchaeota* Phyla. These microbial communities resist high gradients of physical and chemical parameters in water. In this context, temperatures are ranging from 42 to 75°C, pH of the dissolved phase of sediment between 3.0 to 4.1, pH in water between 6.3 to 7.2 and, total dissolved solids between 864 to 879 mg/L and electric conductivity between 1,731 to 1,756 µS/cm. Overall, pH is inversely correlated with water temperature and a positive correlation was observed between pH/DO and EC/TDS. Dissolved cations ratios are $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$; while for the anions are $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$, and a predominance of Na^+ , SO_4^{2-} , and Cl^- . $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ contents show the occurrence of H_2S dissolution, showing a contribution of sulphur species from the hydrothermal fluids. Finally, isotopic signatures of $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{air}}$ and $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ measured in sediments presented negative values, ranging from -27.67 to -16.68 (‰), -6.64 to -0.18 (‰) and -19.88 to 11.45 (‰), respectively.

We determined strong relationships between the hydrogeochemistry and biological indicators, and between the $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ isotopic fractionation with the temperature. Overall, microbial communities were distributed according to physical and chemical parameters, where temperature, dissolved gasses and pH were the main factors driving the community structure. For instance, colder pools are dominated by phototrophic bacteria conforming microbial mats, and hottest ponds by chemolithotrophic microbial communities from the Bacteria and Archaea domains. Stable isotopes underscore the intricate interplay between isotopic signatures and environmental parameters, shedding light on the complex biogeochemical processes at play in this hydrothermal ecosystem. This study will contribute to the understanding of biogeochemical cycles in these fragile ecosystems, that also could be affected and modified in response to the accelerated climate change.

Keywords: Geomicrobiology, Biogeochemistry, Geobiology.

Financing: Fondecyt regular N° 1181773, 1201692, 1211515, 1211977. Paquis, P. is funded through an ANID PhD scholarship N° 21221380. Pardo-Esté, C. is funded through an ANID Postdoctoral fellowship N° 3230189. Pro-Fondecyt regular UCN-VRIDT "Adaptation mechanisms of microbial communities in high-altitude geothermal environments and their importance in understanding the origin of life on primordial Earth. UCN-VRIDT2095 N°128/2022 "Bio-geochemical satellite recognition system in high-altitude hydrothermal ecosystems: climatic evolution and automated prediction models".

Tight interactions of microorganisms with mineral matrices in Atacama soil crusts as stabilizing factor for evaporite soil crusts

Isabel Prater¹, Helge Mißbach-Karmrodt¹, Kathrin König², Daniel Friedrich², Christine Heim¹

(1) University of Cologne, Geobiology, Institute of Geology and Mineralogy, Zùlpicher Str. 49a, Cologne, Germany

(2) University of Cologne, Department of Chemistry, NMR Core Facility, Greinstr. 4, Cologne, Germany

Water is essential for biological activity and a key driver for abiotic surface shaping processes. Therefore, geomorphological development is extremely retarded under hyperarid conditions. Processes shaping the surface and landscape in hyperarid areas are in large parts not well understood yet, especially regarding the microbial contribution.

All life is exposed to additional aggravations beside the dryness in hyperarid regions, e.g. a distinctly high UV radiation and often high temperatures. However, even under extreme conditions like in the Atacama Desert, diverse microbial communities thrive on and within the sediment and thereby strongly interact with the mineral matrices. Common habitats for microbial communities in this environment are fog-receiving surfaces and endolithic zones within evaporite crusts. Endolithic microorganisms are highly adapted to both the substrate and severe water-limitations and colonize protected cracks, niches, and caverns within translucent rocks and crusts. Microbial communities have the potential to alter mineral components and stimulate the formation of secondary minerals as they redistribute moisture and potentially extract crystal water. Processes like these are the groundwork of pedogenesis and, even if proceeding extremely slow, they affect the shape of the surface.

To elucidate the relationship of microbial communities with mineral surfaces, we investigated the biogeochemical traces of microbial communities and their spatial distribution on and within gypsum and halite crusts obtained from the Pisagua region, a transect along the Quebrada de Aroma and the Salar Grande area in the Atacama Desert. We combined imaging techniques (scanning electron microscopy) and biogeochemical methods (GC-MS/MS and NMR) to obtain a deeper insight into the interplay of microorganisms and evaporitic crusts.

Traces of microbial life were detected in all analyzed samples. However, increasing aridity clearly resulted in a decrease in organic compounds. Our results demonstrate that microorganisms in hyperarid surroundings produce extracellular polymeric substances (EPS) that both protect microorganisms against desiccation and stabilize evaporite crusts as they agglutinate mineral particles.

Keywords: microbe-mineral interaction, matrix stabilization, lipid biomarkers, 2D NMR, EPS.

Plant evolution and diversity at the dry limit

Dietmar Quandt¹, Marcus Koch², Julia Bechteler³, Alexandra Stoll⁴, CRC1211 Botany⁵

(1) University of Bonn, Nees Institute for Plant Biodiversity, Bonn, Germany

(2) Heidelberg University, Centre for Organismal Studies (COS), Heidelberg, Germany

(3) RPTU University of Kaiserslautern-Landau, Landau, Germany

(4) CEAZA, La Serena, Chile

(5) CRC1211, Bonn, Cologne, Gatersleben, Heidelberg, Landau, La Serena, Gobabeb, Germany/Chile/Namibia

With 750 to 1000 plant species the Atacama Desert has a rich flora that evolved to its extreme and harsh arid environmental conditions. We focused on a variety of plant groups with different life history traits from the families Asteraceae, Bromeliaceae, Cactaceae, Loasaceae, Malvaceae and Zygophyllaceae to decipher their evolutionary history in the Atacama Desert and trace down colonization patterns in the past and the future, as well as the genetic basis of their adaptation to this (hyper-)arid desert. In an interdisciplinary setting we place our population genetic and genomic/transcriptomic analyses in the context of geological, geomorphological and climatic data. Our results point to an evolutionary young flora that originated mainly during the Paleogene and Neogene with accelerated diversification radiations taking place since the last 5-6 million years.

The onset of hyper-aridity during the late Miocene as well the Quaternary climate oscillation have played a major role in the diversification of various plant groups. Population genetic analyses indicate that the dry core of the northern part of the Atacama acts as powerful barrier for floristic exchange and gene flow (e.g., *Ophryosporus* (Asteraceae), *Huidobria*, (Loasaceae)) which does not hold true for the southern part of the Atacama that is characterized by ravines and valleys connecting the coast to the Andean foothills. Observed genetic clusters are linked to ravines linking the coast with the Andes and are mirrored in gene expression patterns thus offering valuable insights into the genetic adaptation of desert plants (e.g., *Huidobria chilensis*). In addition, genetic isolation of coastal taxa is indicated due to recent climatic variability (e.g., *Cristaria* (Malvaceae)). Our results stemming from the Atacama flora are tested in the corresponding desert system of the Namib (e.g., *Kissenia* (Loasaceae), *Zygophyllum* (Zygophyllaceae)). in southern Africa and will enable us to find general patterns of plant evolution in arid environments.

***CRC1211 Botany** in alphabetical order: Georg Bareth, Tim Böhnert, Olaf Bubenzer, Dörte Harpke, Lara Iaboli, Sarina Jaboli, Federico Luebert, Andrea Jäschke, Gillian Maggs-Kölling, Eugene Marais, Simon Matthias May, Rosa Stella Mbulu, Felix Merklinger, Paloma Morales, Carsten Münker, Janet Rethemeyer, Benedikt Ritter, Jan Schween, Alexander Siegmund, Michael Staubwasser, Eric Stein, Thomas Wiehe.

Keywords: (1) evolutionary history, (2) environmental change, (3). Population genetics.

Financing: This study was funded by the German Research Foundation (DFG) – Project: INST 216/860 – SFB 1211 (<http://sfb1211.uni-koeln.de/>).

Acknowledgments: CRC1211: Evolution at the dry limit.

References:

- Böhnert T, Luebert F, Merklinger F, Harpke D, Stoll A, Schneider J, Blattner F, Quandt D, Weigend M. 2022. Plant migration under long-lasting hyperaridity – phylogenomics unravel recent biogeographic history in one of the oldest deserts on Earth. *New Phytologist* 10.1111/nph.18082.
- Böhnert T, Weigend M, Merklinger F, Quandt D, Luebert F. 2020. Historical assembly of Zygophyllaceae in the Atacama Desert. *Frontiers of Biogeography* 12: e45197; 10.21425/F5FBG45197.
- Böhnert T, Luebert F, Ritter B, Merklinger F, Stoll A, Schneider J, Quandt D, Weigend M. 2019. Diversification of *Cristaria* (Malvaceae) correlates with Andean orogeny and the onset of hyperaridity in the Atacama Desert. *Global and Planetary Change – Special issue CRC1211* – 181: 102992; 10.1016/j.gloplacha.2019.102992.
- Koch M, Stock C, Kleinpeter D, del Rio C, Osses P, Merklinger FF, Quandt D, Siegmund A. 2020. Vegetation growth and landscape genetics of Tillandsia lomas at their dry limits in the Atacama Desert show fine-scale response to environmental parameters. *Ecology and Evolution* 10.1002/ece3.6924.
- Merklinger FF, Böhnert T, Weigend M, Quandt D, Luebert F. 2021. Quaternary diversification of a columnar cactus in the driest place on Earth. *American Journal of Botany* 108: 184–199.
- Ruhm J, Böhnert T, Weigend M, Merklinger FF, Stoll A, Quandt D, Luebert F. 2020. Plant life at the dry limit - Spatial patterns of floristic diversity and composition around the hyperarid core of the Atacama Desert. *PlosOne* 15: e0233729. 10.1371/journal.pone.0233729.
- Stoll A, Harpke D, Schütte C, Jimenez L, Letellier L, Blattner F, Quandt D. Genetic consequences of human driven habitat fragmentation on the endangered Atacama Desert shrub *Balsamocarpon brevifolium* Clos. *Global and Planetary Change – Special issue CRC1211* – 184: 103059; 10.1016/j.gloplacha.2019.103059.

Estudio de texturas macro y microscópicas de la Formaciones Soledad e Hilaricos en las Regiones de Tarapacá y Antofagasta, Desierto de Atacama

Andrés Alberto Quezada Jara¹, Teresa Jordan², Nicolas Blanco Pavez¹, Paulina Vásquez Illanes¹, Fernando Sepúlveda Vásquez¹

(1) Sernageomin, Geología General, Unidad de Geología Regional, Santa María 104, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Cornell, Earth & Atmospheric Sciences, Snee Hall, NY14853, Ithaca, USA

En el núcleo hiperárido del desierto de Atacama, afloran las Formaciones Hilaricos del Mioceno Superior y Soledad del Plioceno (Sepúlveda et al., 2014; Vásquez et al., 2018; Jordan et al., 2022). Ambas unidades están formadas principalmente por rocas en las que abundan minerales sulfatados como yeso y anhidrita. De acuerdo con sus relaciones morfoestratigráficas y en particular por su litología, la Formación Soledad fue interpretada como los depósitos químicos del gran Lago Soledad (Brüggen, 1950), o como los de ambiente tipo salar (Pueyo et al., 2001). En los depósitos de la Formación Hilaricos se interpretó un ambiente evaporítico lagunar similar al de los salares actuales (Bobenrieth, 1980; Pueyo et al., 2001). En ambas unidades, predominan capas macizas de anhidrita, anhidrita pseudomorfa de yeso prismático y, en menor medida yeso prismático. La anhidrita es de color pardo claro, rugosa en sus caras expuestas y de color blanco en cara fresca, por lo que la sucesión suele tener un aspecto monótono, sin más contraste que los quiebres horizontales de remanentes de estratificación centimétrica a decimétrica. Estos rasgos son generados en varias generaciones de diagénesis, desde sinsedimentaria hasta muy reciente, obliterando los rasgos de sedimentación primaria. La interpretación de los ambientes de depósito en el tiempo, tanto como de condiciones subsuperficiales, es difícil por la entremezcla de generaciones. Este estudio establece un avance en tales interpretaciones, a partir de los rasgos macroscópicos y petrográficos y comparaciones con el salar activo de Bellavista-Pintados.

Se identificaron perfiles que incluyen limos, arenas y tefras, en algunos casos con estructuras sedimentarias primarias, además de las capas completamente sulfáticas. Estas litologías pueden mostrar contactos irregulares y de fuerte contraste con zonas en que minerales de sulfatos las reemplazan o desplazan parcial o totalmente, o donde estos últimos irrumpen entre sus depósitos, texturas que evidencian que mayoritariamente la anhidrita y yeso son diagenéticos. Las texturas de estas litologías y las características de los límites entre anhidritas y capas siliciclásticas son estudiadas petrográficamente en 18 cortes transparentes, confeccionados a partir de 17 muestras de las formaciones Hilaricos y Soledad, provenientes de las localidades: (a) cerro Soledad (6 de Fm. Soledad), (b) al este de pampa Maya (5 de Fm. Soledad), (c) margen este del cañón del río Loa al sureste de Calate (4 de Fm. Hilaricos) y (d) al sureste del cerro Cono de Hilaricos (2 de Fm. Soledad).

En depósitos recientes del salar de Bellavista-Pintados, se observó un perfil consistente en una costra superficial de halita eflorescente y sulfatos entrecrecidos con limos rojos (espesor 30 a 50 cm) que sobreyacen a depósitos siliciclásticos laminados (espesor 30 cm), desplazados por abundantes cristales tabulares y prismáticos de yeso de entre 1 y 4 mm. Algunos de los cristales más grandes tienden a alinearse en los límites de las láminas, destacándolas. La precipitación de sales se genera mediante el mecanismo de ascensión por capilaridad impulsada por el efecto de la fuerte evaporación sobre la napa de agua, que allí, está cerca de la superficie, por lo cual precipita (en este caso) yeso a partir de los elementos disueltos en las aguas. Este es un reconocido proceso formador de depósitos salinos en general (Warren, 2016), que en particular origina las costras de los salares Bellavista-Pintados. Para la Fm. Soledad, las relaciones macro y los detalles microscópicos observados, confirman un sistema equivalente en que se formaron las sales, en el sentido que habría dependido de las variaciones de la altura de la tabla de agua durante su desarrollo para formar paulatinamente cristales evaporíticos que pueden obliterar las litologías y sus estructuras primarias parcial o totalmente. También para la Formación Hilaricos, se deduce un ambiente de depósito similar, lo que confirma los mecanismos interpretados en la literatura respecto de la génesis de sus sales (Pueyo et al., 2001, Vásquez et al. 2018, Jordan et al., 2022). Este resultado para los remanentes de sedimentos primarios (e.g., limos) y diagenéticos sinsedimentarios (yeso) es consistente con interpretaciones previas respecto a que el clima hiperárido ha dominado en la zona desde el Mioceno.

Palabras Clave: Formación Soledad, Anhidrita, Yeso, Desierto de Atacama, Formación Hilaricos.

Financiamiento: Esta contribución es parte y resultado del trabajo en el programa regular de mapeo geológico de la Subdirección de Geología de SERNAGEOMIN y fue financiado en el marco del Plan Nacional de Geología (PNG).

Agradecimientos: A los conductores, equipo logístico y Taller de Cortes Transparentes de SERNAGEOMIN. Agradecimientos póstumos a Antonio "Tucó" Díaz por su asistencia logística.

Referencias:

- Bobenrieth, L. 1980. Geología de los cuadrángulos Cerro Desamparado y Cerro Soledad, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 171 p., 5 mapas a diferentes escalas. Santiago.
- Brüggen, J. 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar: 374 p. Santiago.
- Jordan, T.; Quezada, A.; Blanco, N.; Jensen, A.; Vásquez, P.; Sepúlveda, F. 2022. Paleoenvironmental evolution of a forearc in response to forcings by drainage, climate, volcanism, and tectonics: The quillagua depocenter, Chile. *Lithosphere* 2022, 1024844.
- Pueyo, J.J.; Chong, G.; Jensen, A. 2001. Neogene evaporites in desert volcanic environments: Atacama Desert, northern Chile. *Sedimentology* 48: 1411-1431.
- Sepúlveda, F.A.; Vásquez, P.; Quezada, A. 2014. Cartas Patillos y Oficina Victoria, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 167-168: 107 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Vásquez, P.; Sepúlveda, F.A.; Quezada, A.; Aguilaf, S.; Franco, C.; Blanco, N. 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 195-196: 93 p. 1 mapa escala 1:100.000, 1 CD con anexos. Santiago.
- Warren, J.K. 2006. *Evaporites: Sediments, Resources & Hydrocarbons*. Springer, Berlin Heidelberg: 1035 p. Würzburg.

Studies of Nitrate Deposits in the Atacama Desert, Chile: Insights from Triple Oxygen Isotopes in Nitrates and Sulfates, and Strontium Isotopes

Camila Javiera Rizzo Contreras¹, Michael Staubwasser¹, Guillermo Chong², Katharina Deußen¹, Carsten Münker¹

(1) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Zùlpicher str 49b, Cologne, Germany
 (2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

The Atacama Desert in northern Chile is one of the oldest and driest places on Earth, characterized by continuously arid conditions since the mid Tertiary time [2] and hyperarid since the Pliocene [3]. These extreme aridity conditions make it an ideal environment for the accumulation of highly soluble salts, including the Nitrate Deposits which are of economic importance and scientific interest [5,6,7]. Despite almost two centuries of its exploitation and associated scientific studies, a comprehensive generic model fitting the extremely variable settings and types of nitrate deposits has not yet been accepted.

Geochemical and isotopic evidence suggests predominant aeolian deposition of sea salt [8] and atmospheric deposition of ozone oxidation products with diagnostic $\Delta^{17}\text{O}$ anomalies in the nitrate and sulfate deposits [9,10]. Current and more accepted models invoke two mechanisms of Nitrate Deposit formation. The first one includes episodic rain and washing-down of salts from the soil surface followed by evaporative reprecipitation that is believed to concentrate nitrate and associated salts in sedimentary continental sequences, mainly in alluvial fans [11]. A second conclusion suggests salts dissolution in low- O_2 groundwater - indicated by heavy Cr-isotope enrichment - in the Central Depression aquifers and Salars followed by precipitation after capillary activity and evaporation [12,13]. However, nitrate deposits are found in a much wider range of geologic settings [5,6,14] of which many are not easily explained by these two mechanisms, e.g. pure nitrate veins and manto-type veins up to 1 m thick cutting through Jurassic marine rocks or volcanic host rocks at depths of 25 m. These types of deposits don't appear to fit with evaporitic concentration processes. The nitrate veins and manto-type veins described above are too thick and deep, far displaced from feasible aquifers to be easily related with capillary evaporitic concentration from dilute groundwater because the capillary fringe in sediments rarely exceeds two meters [15]. These observations suggest at least the possibility of redissolution of primary nitrate deposits by hydrothermal and seismic activity, and brine displacement into fracture systems, fault planes and stratigraphic boundaries.

This study investigates a possible origin of nitrate deposits by analyzing triple oxygen isotopes in nitrates and sulfates to trace the pathways and mechanisms through which nitrates deposits are formed and preserved, providing insights into the sources of nitrate ions and the processes involved in their formation. The triple oxygen isotope values in nitrates offer constraints on the formation processes, such as bacterial denitrification and atmospheric photochemical reactions [9,13]. These isotopic fingerprints can differentiate between different sources, including atmospheric deposition, groundwater, and paleo-seawater, thereby giving clues to interpret the possible origin and evolution of these deposits.

Sulfate is the dominating salt in soils of the Atacama Desert [8,16] and is also present in Nitrate Deposits. Thenardites and mirabilite appear in the stratigraphy sequence of most of the sedimentary deposits between 5-65 cm below the surface [5,16]. Gypsum is present throughout the stratigraphic sequence in different concentrations, but our main interest is when it occurs in groups of veins of nitrates and sulfates cutting Lower Tertiary volcanic rocks. Analyzing the triple oxygen isotopes in sulfates from Nitrate Deposits we can distinguish between secondary atmospheric sulfate, deposition of sea spray, biological sulfate reduction, and reoxidation. For thenardites, appear to fall on a unique trend in the multi-isotope plots, tending towards zero in $\Delta^{17}\text{O}_{\text{SO}_4}$ and very low $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, extrapolating this trend to $\Delta^{17}\text{O}_{\text{SO}_4} = 0\text{‰}$ yields a hypothetical hydrothermal endmember [16].

Additionally, the strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Nitrate Ore Deposits can provide further information about the origin of nitrates. The strontium isotope composition is influenced by the surrounding geology and the interaction between nitrate-bearing fluids (high and low temperature) and host rocks [17,18]. By comparing the strontium isotopic ratios in Nitrate ore deposits with known geological formations, potential sources of nitrates can be explored. The combination of these isotopic systems offers a comprehensive approach to understanding and provides new ideas of the origin and evolution of these still enigmatic deposits in the Atacama Desert.

Keywords: Atacama Desert, nitrate deposits, triple oxygen isotopes, strontium isotopes.

Financing: German Research Foundation (DFG), CRC 1211 project.

Acknowledgments: Thanks to Swea Klipsch for sharing her knowledge on the pyrolysis method, Jochen Scheld for his training in element/nitrate concentrations measurements and the German Research Foundation (DFG).

References:

- [1] <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.008>.
- [2] <https://doi.org/10.1130/G21184.1>.
- [3] [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0043:LPAFTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0043:LPAFTA>2.0.CO;2).
- [4] <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.004>.
- [5] <https://doi.org/10.3133/pp1188>.
- [6] [doi:10.1007/978-3-642-77353-2_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2_22).
- [7] <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n3a020720>.
- [8] <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103077>.
- [9] <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.009>.
- [10] <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.006>.
- [11] <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.020>.
- [12] <https://doi.org/10.1130/G34969.1>.
- [13] <https://doi.org/10.2138/gselements.14.4.251>.
- [14] Rizzo, C. 2020. Nuevos Antecedentes Geológicos del Cretácico Superior-Paleógeno en la Depresión Central de la Región de Antofagasta. El caso de Cerro.
- [15] Birrete (7.447.300-7.456.000 mN y 427.600-441.100 mE), Norte de Chile. Tesina para optar al grado de Geóloga. Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas. 111p.
- [16] <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.017>.
- [17] SSRN Electronic Journal, DOI: 10.2139/ssrn.4335390.
- [18] [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01175-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01175-4).
- [19] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.356>.

Anomalous preservation of fault scarps in northern Chile: Implications for determining the recent tectonic activity of the Atacama Fault System

Paulina Rivera¹⁻², Gabriel González¹⁻², Steven Binnie³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) CIGIDEN, National Research Center for the Integrated Management of Natural Disasters, Av. Vicuña Mackenna 4860, La Florida, Chile

(3) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Zùlpicher Str. 49b, Cologne, Germany

The occurrence of tectonic scarps in the Atacama Fault System (AFS) between 23°S and 24°S is evidence of important fault activity during the Quaternary. Some of these conspicuous fault scarps exhibit a *free-face* preserved in Pliocene-Pleistocene faulted alluvial deposits. In general, the preservation of the free-face is considered a morphological marker of historical fault activity. In most of the deserts it has been observed that the free face disappears after a few hundreds of years (Wallace, 1977). However, according to optically stimulated luminescence dating of deposits derived from the degradation of the fault scarps of the AFS, the most recent displacement along these faults occurred during the Late Pleistocene (Del Río et al., 2019). This obvious contradiction demonstrates that *free-face* preservation is an anomalous condition linked to the extreme aridity prevalent in the Atacama Desert since at least the Late Pliocene (Amundson et al. 2012). In this study, we investigated the factors controlling the preservation of the AFS fault scarps. The study cases correspond to the three main faults in the SFA: Naguayán, Cerro Fortuna, and Salar del Carmen. We used the following methodologies to test our hypothesis: a) morphological characterization of the fault scarps for identification the erosive processes involved in their degradation, b) determination of erosion rates by using ¹⁰Be, and c) mineralogical characterization of gypsic soil horizons exposed in the fault scarps. Our results demonstrate that the fault scarps reach heights of 4.5 m. According to the slope angle distribution proposed by Wallace (1977), scarp faults are predominantly characterized by a *debris slope* (35°-40°), with localized occurrences of *free-faces* (> 40°). The Salar del Carmen fault scarp is one of the best-preserved morphological features. In this case, the degradation of the *free-face* is strongly inhibited by the presence of a tough salt crust. The erosion rate in the catchments of the Coastal Cordillera is to some degree dependent on episodic rain events. These pluvial episodes also facilitate discharge and channel incision of the ephemeral drainages that cross the fault scarp. The determination of the basin-wide erosion rates indicates that the catchments upstream of the faults are dominated by extremely low erosion rates (1 to 3 m/Ma). Gypsic soil horizons are characterized by a marked destruction of the original sedimentary structure of the faulted gravely deposits being the fabric dominated by a saline matrix. X-ray diffraction identified crystalline phases such as gypsum, anhydrite, and nitratine in the *free-face* of the Salar del Carmen fault scarp. The growth mechanism of the Salar del Carmen Fault shows the first displacement history associated with paleoearthquakes (Cortés et al., 2012; González et al., 2006), and a second mechanism is dominated by centimeter displacement. The first mechanism is evidenced by *colluvial wedges* and the second by laminated and well-selected hillslope deposits. Optically stimulated luminescence dating on feldspar grains suggests that the most recent slip-rate of this fault is on the order of 0.01 mm/a (Del Río et al., 2019). This rate is one order of magnitude higher than the erosion rates in the catchments. This allows us to deduce that the preservation of the fault scarps is due to an imbalance between the fault slip rate and erosive processes. This imbalance reveals that extreme aridity is a first-order factor that allows the preservation of the AFS fault scarps in the Atacama Desert.

Keywords: fault scarp, Atacama Fault System, erosion rates, Atacama Desert.

Financing: FONDECYT Regular Project 1200170 IP: Dr. Gabriel González.

Acknowledgments: ANID (Chile) for funding were provided through the National PhD Grant 21200521, the FONDECYT Regular Project 1200170 and the Cosmogenic Nuclide Laboratory of the University of Cologne, Germany.

References:

- Amundson, R., Dietrich, W., Bellugi, D., Ewing, S., Nishiizumi, K., Chong, G., Owen, J., Finkel, R., Heimsath, A., Stewart, B., Caffee, M., 2012. Geomorphologic evidence for the late Pliocene onset of hyperaridity in the Atacama Desert. *Geol. Soc. Am. Bull.* 124, 1048–1070.
- Cortés, J., G. González, S. A. Binnie, R. Robinson, S. Freeman & G. Vargas. 2012. Paleoseismology of the Mejillones Fault, northern Chile: Insights from cosmogenic ¹⁰Be and optically stimulated luminescence determinations. *Tectonics*, 31, TC2017, [doi: 10.1029/2011TC002877](https://doi.org/10.1029/2011TC002877).
- Del Río, I., Sawakuchi, A. O., González, G. 2019. Luminescence Dating Of Sediments From Central Atacama Desert, Northern Chile. *Quaternary Geochronology*, (53), 101002. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.05.001>.
- González, G., Dunai, T., Carrizo, D., Allmendinger, R., 2006. Young displacements on the Atacama fault system, northern Chile from field observations and cosmogenic ²¹Ne concentrations. *Tectonics* 25 (TC3006), 3001–3015.
- Wallace, R.E. 1977. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1267-1281.

40Ar/39Ar and U-Pb ages of Cenozoic tephros from the Precordillera, northern Chile, and their regional correlations (21°30' S)

Fernando Sepúlveda Vásquez¹, Paulina Vásquez Illanes¹, Edwin González Abarca¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Regional, Avenida Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Neogene deposits crop out at the western margin of the Sierra de Moreno, in the Antofagasta Region, northern Chile (ca. 21°30' S). They were generated as a consequence of the uplift of the Andes during the Cenozoic and correspond to the erosional products of the basement units, deposited as alluvial deposits on the western slope of the Andes. These deposits often contain discrete intercalations of tephra layers, which help to establish an appropriate chronostratigraphic framework for these strata.

In this study, six new ⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau* ages were determined from tephra interbedded within different alluvial deposits. Additionally, three U-Pb LA-ICP-MS zircon ages were obtained from a selection of the tephra, showing that both geochronological methods provide concordant results.

The oldest age obtained is an ⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau* age of 19.10±0.07 Ma from a lenticular tephra interbedded in Lower Miocene alluvial deposits. This determination is similar to the 19.8 Ma age of the Tambillos Ignimbrite (Blanco & Tomlinson, 2013). These alluvial deposits unconformably overlie Mesozoic strata and are incised by younger drainages, generating a conspicuous relief. They consist mostly of well-cemented clast-supported gravels, having a gentle westward dip (ca. 10°) and a minimum thickness of 100 m. These alluvial deposits correspond to the oldest Cenozoic unit cropping out in the study area and are stratigraphical equivalent to the upper section of the Altos de Pica Formation (*sensu* Blanco & Tomlinson, 2013).

A younger (Upper Miocene - Pliocene) alluvial unit is unconformably deposited on top of the Lower Miocene deposits. This unit has a relatively low relief and 15 m minimum thickness. The oldest ages determined for this unit were obtained from isolated outcrops in the northern part of the study area. There, a lenticular tephra layer was dated at 8.14±0.07 Ma (⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau*) and 8.1±0.1 Ma (U-Pb zircon), and a faulted tephra layer was dated at 6.56±0.03 Ma (⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau*). The first ages are similar to the 8.8 Ma age of the Ujina Ignimbrite (Blanco & Tomlinson, 2013). The alluvial unit also has outcrops embedded in the walls of Quebrada Arca, where ages of 5.79±0.04 Ma (⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau*) and 5.7±0.1 Ma (U-Pb zircon) were determined for a tephra layer. These ages are concordant with the 5.7 Ma age of the Carcote Ignimbrite (Aguilef *et al.*, 2019). The youngest age for these alluvial deposits was determined from a 7 m thick tephra layer at the mouth of an unnamed ravine, in the central part of the study area. There, ages of 2.59±0.04 Ma (⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau*) and 2.86±0.05 Ma (U-Pb zircon) were obtained for the base of the tephra layer. Although it is not possible to establish the relative stratigraphic position of each tephra layer within the unit, because of their location in widely separate sections, the field relations and their geographic positions allow us to infer that they are all part of the same Upper Miocene - Pliocene unit. This alluvial unit correlates chronostratigraphically with the Upper Miocene-Pliocene deposits of the Quillagua Depocenter (Jordan *et al.*, 2022) in the Central Depression, and is coeval with the youngest deposits of the Alto Hospicio Gravels (Marquardt *et al.*, 2008) in the Coastal Cordillera of the Tarapacá Region.

The youngest age determined in the study area is an ⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite *plateau* age of 0.375±0.017 Ma, from a tephra layer collected within a small ravine incised into Lower Miocene alluvial deposits. Similar ages have been obtained in tephra layers intercalated in Pleistocene-Holocene alluvial deposits in the Coastal Cordillera and Central Depression of the Tarapacá Region (Vásquez *et al.*, 2018).

The results obtained in this study allow to establish a local tephrochronology for the different assemblages of alluvial deposits in the Precordillera, and also show that ⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite (*plateau* ages) and U-Pb zircon radiometric dating of Cenozoic tephra layers in (hyper-)arid climatic conditions produce concordant results.

Keywords: tephrochronology, Cenozoic deposits, northern Chile.

Financing: This work is part of the National Mapping Program of the Chilean Geological and Mining Survey (Sernageomin).

Acknowledgments: This work has benefited from fruitful discussion of the Cenozoic geology with A. Tomlinson, N. Blanco and A. Quezada (Sernageomin). Dr. Tomlinson reviewed an earlier version of this abstract.

References:

- Aguilef, S.; Franco, C.; Tomlinson, A.J.; Blanco, N.; Álvarez, J.; Montecino, D.; Gardeweg, M.; Campos, V.; Rodríguez, C.; Maksae, V.; Bodadilla, H.; Vásquez, P.; Grunder, A.L.; Dilles, J.H. 2019. Geología del área Quehuira-Chela, regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 207: 293 p.
- Blanco, N.; Tomlinson, A.J. 2013. Carta Guatacondo, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 156: 109 p.
- Jordan, T.; Quezada, A.; Blanco, N.; Jensen, A.; Vásquez, P.; Sepúlveda, F. 2022. Paleoenvironmental Evolution of a Forearc in Response to Forcings by Drainage, Climate, Volcanism, and Tectonics: The Quillagua Depocenter, Chile. *Lithosphere* 2022(1): 1024844.
- Marquardt, C.; Marinovic, N.; Muñoz, V. 2008. Geología de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 113: 33 p.
- Vásquez, P.; Sepúlveda, F.A.; Quezada, A.; Aguilef, S.; Franco, C.; Blanco, N. 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 195-196: 93 p.

Triple oxygen isotopes in Atacama Desert waters – past and present

Michael Staubwasser¹

(1) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Mathematics and natural sciences, Zùlpicher Strasse 49b, Cologne, Germany

Recently, the backbone $^2\text{H}/^1\text{H}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ analysis of classical isotope hydrology has been expanded by $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements. Isotope fractionation factors (α) during evaporation - e.g. $^{18}\alpha = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{liquid}} / ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{vapor}}$ - may now be expressed for all water isotope systems with $^2\alpha$, $^{18}\alpha$, and $^{17}\alpha$. The latter was formerly neglected because general mass dependency of isotope fractionation between educt and product results in a seemingly constant fractionation coefficient $\theta = \ln ^{17}\alpha / \ln ^{18}\alpha \approx 0.52$. However, methodological developments and high precision mass spectrometry have allowed to reproducibly quantify the tiny differences in θ that arise from whether the underlying process constitutes an equilibrium exchange of isotopes, or a directional kinetic enrichment, e.g. during diffusion (Barkan & Luz, 2005; 2007). At present, experimentally determined values $\theta = 0.529$ and 0.5185 are used for equilibrium and diffusion isotope fractionation, respectively. These experiments also showed that water temperature, which controls individual α values, has a negligible effect on θ within the temperature range typically observed in liquid meteoric water on Earth's surface (Luz & Barkan, 2010). The evaporation of water isotopes can be quantified by a two-step process known as the Craig-Gordon model (CGM) of isotope evaporation that comprises equilibrium exchange during evaporation and condensation between the liquid surface and a thin film of vapor - with α_{eq} - followed by diffusion through another layer - with α_{diff} - into the free atmosphere, commonly. For known pairs of α , that model depends on the inflow composition (R_{inflow}), and evaporation conditions comprising relative humidity (RH), vapor composition (R_{vapor}), air turbulence, and water temperature. Utilizing the CGM for each pair of $^2\alpha$, $^{17}\alpha$, and $^{18}\alpha$, evaporation conditions and inflow composition can now be uniquely constrained from the measurement of water isotopes (Surma et al. 2021). As in classical isotope hydrology, basic mass-balancing principles and the CGMs for the three isotope systems can be combined to estimate the hydrological balance of an evaporating water body with volume change $dV/dt = I + R - Q - E$, where I = inflow, R = rainfall, Q = outflow, and E = evaporation.

The salars of the Atacama Desert are ideal environments for systematically studying water isotope evaporation. In Atacama basins with a permanent terminal lake, volume change is zero in the long term, as $I \approx 0$. E is very high, R is negligible, and I comes from isotopically well constrainable groundwater sources. Over the last ten years, we have studied isotope evaporation in Salar de Llamara (Central Depression) and Salar del Huasco (Altiplano). Each of these studies were accompanied by evaporation experiments. In March 2014 - prior to artificial water injection measures - Salar de Llamara was in a state where evaporation exceeds inflow. In general, our studies show that the isotopic evolution of desert lakes responds strongly to changes in RH and R_{vapor} . The lake's isotopic evolution and, thus, its hydrologic balance, becomes predictable if boundary conditions are monitored. With simple RH and T logging, and monthly to bi-weekly measurement of the other conditions, the seasonal and long-term hydrologic dynamics of a salar's balance in the Atacama Desert can be quantified. This approach may improve hydrologic monitoring of environmentally protected areas as well as salars with ongoing lithium extraction operations.

In addition, we also extracted water from salar gypsum deposits. In slow-precipitating gypsum, the lattice-bound water was confirmed to be in isotopic equilibrium with ambient water. In our study, we used best-fit solutions of the CGM for a large range of evaporation conditions and Monte Carlo uncertainty simulations to assess evaporation conditions of the past. Salar de Llamara turns out to have seen quite constant conditions likely over multiple decades. In addition, the entire system has also been in a hydrologically stable decades-long steady state. In another example, we applied this approach to the geologically ancient Tiliviche paleo-lake system. In a gypsum depositional environment U-Pb dated to 9 Ma - the time of the Tiliviche diatomite lake - we currently find inflow isotopically unchanged compared to the present day, but RH considerably higher. We interpret this as a not wetter but much less evaporative desert environment during the late Miocene. Interestingly, this represents the time just prior to the global expansion of C4 plants and general subtropical aridification.

Keywords: water, stable isotopes, hydrology, Atacama Desert.

Financing: DFG - CRC1211 (German Research Foundation).

References:

- Barkan & Luz (2005), Rapid Comm. Mass Spectrom., 19, 3737-3742.
- Barkan & Luz (2007), Rapid Comm. Mass Spectrom., 21, 2999-3005.
- Luz & Barkan (2010), Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 6276-6286.
- Surma, Assonov, Staubwasser (2021), Rev. Min. Geochem., 86, 401-428.

Phytoliths as a tool for reconstructing the past climatic history of the Atacama Desert

Bárbara Vargas-Machuca¹, Dolores R. Piperno², Antonio Maldonado³⁻⁴, Alexandra Stoll⁴, Volker Wennrich¹, Martin Melles¹

(1) University of Cologne, Geosciences, Mathematics and Sciences, Zùlpicher StraÙe 49a, Cologne, Germany

(2) Smithsonian National Museum of Natural History, Anthropology, 10th St. & Constitution Ave. NW, Washington, DC, United States

(3) Universidad de La Serena, Biología Marina, Ciencias, Larrondo 1281, La Serena, Chile

(4) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Biología, Ciencias, Casilla 554, La Serena, Chile

Phytoliths are micrometer-scale plant microfossils made of monosilicic acid (H_4O_4Si). They are mainly deposited as solid silica (SiO_2) in plant tissues of leaves, stems and roots. After the decay of the plants, phytoliths become buried in the soil and are preserved in sediment records over geological timescales. Because of their good preservation potential under hyper-arid conditions, phytoliths are promising indicators of long-term vegetation changes and associated shifts in climatic conditions of the Atacama Desert. Such phytolith-based vegetation reconstructions could significantly contribute to the currently only discontinuous knowledge of the paleoclimatic history of the driest desert on Earth. The required long and continuous sediment records were recently recovered within the CRC1211 "Evolution at the dry limit" from several endorheic clay pans along a latitudinal transect across the Coastal Cordillera of the Atacama Desert.

The use of phytolith as vegetation proxies in the Atacama is, however, hampered by the only insufficient knowledge of the regional phytolith taxonomy. To overcome this limitation, we conducted a thorough systematic study of phytolith morphotypes from a set of modern plant samples at species and sub-family level and developed a phytolith reference collection/ catalogue of the Atacama flora. This reference catalogue shall be used to identify phytoliths preserved in sediments from Huara, PAG and Paranal clay pans. First short sediment cores of 4.1 m and 6.2 m lengths from the PAG and Huara clay pans have basal ages of about 68 ka and 215 ka, respectively. The cores show distinct variations in sedimentological and geochemical compositions that are traced back to precipitation changes. Longer deep drilling cores have recently been recovered from the PAG and Paranal clay pans, extending to depths of 52 m and 171 m, respectively.

Here, we present the preliminary results of the investigation of the PAG and Paranal clay pans. They data illustrate the potential of phytoliths to provide detailed information on changes in the vegetation communities and the related climate history of the Atacama Desert.

Keywords: Phytoliths, Atacama Desert, Clay pans, Vegetation, Climate history.

Evidence of ancient Groundwater in the Coastal Cordillera at ca. 5 Ma: new U-Pb ages in gypsum

Paulina Soledad Vásquez Illanes¹, Richard Albert², Fernando A. Sepúlveda¹, Benedict Ritter³

(1) SERNAGEOMIN, Geología regional, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Goethe-University Frankfurt, Department of Geosciences, Altenhöferallee 1 60438, Frankfurt am Main, Germany

(3) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Cologne, Germany

The geologic history during the Cenozoic in northern Chile was dominated by sedimentation under arid to hyperarid conditions. This is evidenced by the extensive alluvial deposits found in the current Pampa del Tamarugal and Coastal Cordillera (e.g. Jordan et al. 2022; Ritter et al. 2018; Vásquez et al. 2018). The components of the deposit of the Coastal Cordillera are composed by detritus derived of local geological units, whereas the alluvial deposits present in the Pampa del Tamarugal are composed by detritus that came from the Precordillera zone (e.g., Vásquez et al., 2018). Hence, it can be inferred that deposition in the Coastal Cordillera and the Pampa del Tamarugal was governed by distinct climate regimes (Vásquez et al. 2019).

In the Central Depression, an upper Miocene to Pliocene depocenter characterized by fluvial, shallow lacustrine, and evaporite deposits was active between 9 and 2.6 Ma, referred to as the Quillagua depocenter. This depocenter represents a distal part of the Pampa del Tamarugal (PdT) forearc basin, which has been active since the latest Oligocene until the present time (Jordan et al. 2022). In particular, high-water tables were recorded between 6-2,6 Ma evidenced by presence of lacustrine sediments and evaporites of the Quillagua and Soledad Formations (e.g. Vásquez et al. 2018).

In the Coastal Cordillera, the deep incised Loa canyon provides a unique sedimentary record of the Cenozoic climate and depositional. In this place, we investigated Oligocene conglomerates (Cañón del Loa Beds), which are related to the upper Oligocene to Pliocene Alto Hospicio gravels. Both units are separated by a ~1 m thick gypsisol that represents a phase of non-sedimentation (Sepúlveda y Vásquez, 2019). In this work, we present the results of five U-Pb ages obtained from gypsum samples of the gypsisol. The obtained age of ~4.8-5.2 Ma, is much younger than the obtained age of several tephra layers intercalated in the Alto Hospicio Gravel (22.5 - 21.4 Ma, Ar/Ar ages, Vásquez et al. 2018). Therefore, one possibility is that the dated gypsum corresponds to a recrystallization age generated by the action of ancient groundwater that produced dissolution and in-situ reprecipitation of gypsum, which is now better defined as groundwater calcrete or gypscrite. Another argument supporting this hypothesis is that this obtained age coincides with the wettest period in the Cenozoic record in the Pampa del Tamarugal represented by the Quillagua depocenter. We propose that a major recharge of the Quillagua basin, in the period between 5.2 and 4.8 Ma, percolated into the Coastal Cordillera through permeable sediments (such as faults or discontinuities). This process led to the reprecipitation of sulphate present in the gypsisol.

Keywords: groundwater, hyperarid, paleoclimate

Financing: This work is part of the National Mapping Program of the Chilean Geological and Mining Survey and partially funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – Projektnummer 268236062 – SFB 1211.

Acknowledgments: We thank Damián López for the organization and also for the risks he took to get our samples.

References:

- Jordan, T., Quezada, A., Blanco, N., Jensen, A., Vásquez, P., Sepúlveda, F. (2022). Paleoenvironmental evolution of a forearc in response to forcings by drainage, climate, volcanism, and tectonics: The Quillagua Depocenter, Chile. *Lithosphere*.
- Ritter, B., Stuart, F. M., Binnie, S. A., Gerdes, A., Wennrich, V., & Dunai, T. J. (2018). Neogene fluvial landscape evolution in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Scientific reports*, 8(1), 13952.
- Sepúlveda, F.A.; Vásquez, P., 2019. Paleogene (Eocene?- Oligocene) sedimentation and associated tectonic setting in the Coastal Cordillera of northern Chile (21°-21°30' S). EGU 2019. Viena, Austria Volume: Geophysical Research Abstracts Vol. 21.
- Vásquez, P., Sepúlveda, F., Quezada, A., Aguilera, S., Franco, C.; Blanco, N. 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica n°195-196, p. Escala 1:100.000 [monografías], Santiago.
- Vásquez, P., Sepúlveda, F.A., Quezada, A. (2019). Cenozoic paleoclimate evolution in the Coastal Cordillera of Northern Chile (20°00'-21°30'S). EGU 2019. Viena, Austria Volume: Geophysical Research Abstracts Vol. 21.

The interaction of rivers, climate and tectonics in the Atacama Desert: insights from a multi-methodological study

Ambrosio Vega Ruiz¹, Ariane Binnie², Pia Victor¹, Kathrin P. Lampert³, Klaus R. Reicherter⁴, Gabriel González⁵, Laura Evenstar⁶, Steven A. Binnie²

- (1) Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Lithosphere Dynamics, Potsdam, Germany
(2) Institute of Geology and Mineralogy, University of Cologne, Cologne, Germany
(3) Institute of Zoology, University of Cologne, Cologne, Germany
(4) Neotectonics und Natural Hazards Group, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(5) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
(6) School of Environment and Technology, University of Brighton, Brighton, UK

The Atacama Desert in northern Chile is considered to be the driest, oldest desert on Earth. None-the-less, even the hyperarid core of this desert is host to several deeply incised, fluvially active river canyons. The rivers that are running through these canyons source their discharge from the high Andes and Precordillera and flow west through the hyperarid Atacama. While many rivers have managed to cut through the intervening Coastal Cordillera on their way to the Pacific Ocean, others are endorheic, terminating in the Central Depression, a foreland basin lying between the Andes and the coastal mountain range. In addition to these major drainages, evidence for relatively recent activity of lower-order streams is apparent in the form of paleochannels that are well preserved on the intervening low-relief interfluvies (pampas) within the Central Depression. The history of the fluvial network as a whole is tied to the tectonic framework and climatic evolution of the region, and so a better understanding of the timing and forcing mechanisms of drainage reorganisation and incision can reveal insights into the broad-scale, external forcing factors.

Within the CRC1211 research consortium (Earth - Evolution at the dry limit) we have applied cosmogenic nuclide and molecular clock dating approaches to better understand the histories of Atacama drainages and used remote sensing, GIS and field validation to study the links to fault driven surface deformation. Our focus has been concentrated in the north of Chile, between approximately 19°S to 20°S. Cosmogenic ¹⁰Be, ²⁶Al and ²¹Ne exposure ages define the Quaternary history of drainage deflection due to fault uplift on Pampa Tana and suggest surface warping due to displacement of an underlying west-vergent reverse fault drove the reorganisation of small streams on the pampa at around 2 Myr. Combined with stream profiles from digital elevation model data, we estimate the maximum average long-term vertical surface displacement rates are 12 m/Myr. The exhaustive fault mapping based on high-resolution imagery and DEM datasets, and field ground truthing reveals that this structure is part of a complex and southward propagating NW-SE strike-slip fault system comprising Central Depression - Western Precordillera between approximately 18°30'S to 19°30'S. Beheading, reorganisation, and southward deviation of drainages related to Late Cenozoic - Quaternary activity of similar blind segments of this fault system is observed broadly within the region. Further south, dating of paleochannels of the Quebrada Aroma as it flows into the Central Depression suggest it was diverted around 500 and 300 kyr ago, with the most recent event rerouting the quebradas direction from north to south. Initial comparisons of the fluvial history to the results of molecular clock dating from Altiplano salars at comparable latitudes show a pattern of amphipod (freshwater shrimp) speciation that broadly matches the Quaternary evolution of the fluvial history we find in the Central Depression, implying river evolution is controlled by a common, regional-scale process

Keywords: Faulting, Fluvial Evolution, Cosmogenic Nuclide Dating, Molecular Clock Dating, Atacama Desert.

Financing: This work was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – Projektnummer 268236062 – SFB 1211.

Tectonic forcing of rivers in the Atacama Desert: Late Cenozoic strike-slip tectonics and drainage reorganization across the N-Chile forearc

Ambrosio Vega Ruiz¹, Ariane Binnie², Pia Víctor¹, Kathrin Lampert³, Klaus Reicherter⁴, Gabriel González⁵, Laura Evenstar⁶, Steven A. Binnie²

- (1) Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Lithosphere Dynamics, Potsdam, Germany
 (2) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Cologne, Germany
 (3) Institute of Zoology, University of Cologne, Cologne, Germany
 (4) RWTH Aachen University, Neotectonics und Natural Hazards Group, Aachen, Germany
 (5) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
 (6) School of Environment and Technology, University of Brighton, Brighton, UK

The Northern Chile forearc hosts part of the Atacama Desert, one of the driest and oldest deserts on Earth. Despite its hyperarid conditions, this forearc landscape is active and characterized by multigenerational alluvial surfaces forming a hanging, regional scale pediplain (Pacific Paleosurface) [1], deeply incised by fluvial canyons (quebradas) where present-day run-off is focused. Both the Pacific Paleosurface and quebradas evolution are intrinsically linked to multiscale tectonic processes. Thanks to the long-term hyperarid climate, related fluvial and tectonic landforms are well preserved and lack vegetation cover. Between 18°30'S to 19°30'S in the Central Depression, cosmogenic (¹⁰Be, ²⁶Al and ²¹Ne) exposure ages of relict alluvial surfaces and fluvial deposits from paleochannels incised into topography above a blind fault (Pampa de Tana Anticline, PTA) are evidence for southward channel abandonment during the Quaternary and suggest surface uplift due to displacement along a blind reverse fault [2]. This highlights the need to better understand the underlying tectonic architecture of the Central Depression, kinematics and chronology of fault activity within the region. Here, we explore and quantify the influence of crustal faulting in reorganizing the drainage in this area of high sedimentation but low displacement rates.

First, we performed an exhaustive regional geomorphic mapping of tectonic landforms and drainage patterns based on high-resolution DEMs, satellite and UAV imagery data, and a ground truthing campaign. We revealed evidence of a reactivated complex inherited strike-slip fault system across the forearc, deforming Miocene to Quaternary surfaces. This fault system includes the PTA and similar blind NW-SE compressive structures with very low surface uplift rates along the Central Depression. Southward decreasing surface expression of faulting with an increasing number of beheaded shallow-incised paleochannels and southward deviation of drainage networks suggest an overall southward propagation of the fault system and implies that large drainage reorganization patterns can be triggered by relatively little displacement along often blind fault structures in this hyperarid setting.

We combined the surface evidence with the interpretation of a reprocessed ENAP seismic section at ca. 19°20'S. This section is ca. 50 km long and crosses the PTA and the western Precordillera. We extended the section ca. 10 km and complemented diffusive reflectivity areas with field observations and structural data. We suggest that the underlying structure of the PTA and western Precordillera consists of NW-SE west-vergent reverse faults and backthrusts, inherited from Late Cretaceous times and later inverted during the Oligocene-Miocene. From Late Miocene and onwards, faults have a right-lateral component, as surface evidence suggests.

Keywords: Tectonic Forcing, Geomorphic Mapping, Seismic Section, Atacama Desert, Fluvial Evolution.

Financing: This work was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – Projektnummer 268236062 – SFB 1211.

References:

- [1] Evenstar, L. A., Mather, A. E., Hartley, A. J., Stuart, F. M., Sparks, R. S. J., & Cooper, F. J. (2017). Geomorphology on geologic timescales: Evolution of the late Cenozoic Pacific paleosurface in Northern Chile and Southern Peru. *Earth-Science Reviews*, 171, 1-27.
- [2] Binnie, S. A., Reicherter, K. R., Victor, P., González, G., Binnie, A., Niemann, K., ... & Dunai, T. J. (2020). The origins and implications of paleochannels in hyperarid, tectonically active regions: The northern Atacama Desert, Chile. *Global and Planetary Change*, 185, 103083.

TephATA: A Tephrostratigraphic Framework for the Atacama Desert and its Application on Regional Sedimentary Archives

Niklas Leicher¹, **Volker Wennrich**¹, Vincent Feldmar², Tanja Kramm², Paulina Vásquez Illanes³, Fernando Sepúlveda Vásquez³, Andrés Quezada Jara³, Georg Bareth², Bernd Wagner¹

(1) University of Cologne, Institute for Geology and Mineralogy, Zulpicher Strasse 49a, Cologne, Germany

(2) University of Cologne, Institute of Geography, Cologne, Germany

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Regional, Santiago, Chile

A fundamental aspect to study past Earth surface processes over time and to set local observations in a regional and global context is a robust chronology. In extremely water-limited environments, however, accurate dating of sedimentary archives documenting these variations can be hampered by applicable dating methods (e.g. temporal range of methods, type of archive). Tephrostratigraphy and -chronology can be applied independent of the type of sedimentary archive and thus represent powerful tools for dating and synchronization of archives in arid environments. Based on their glass geochemical composition, equivalent tephra layers found in different archives can be correlated and age information can be transferred to tephra layers that does not contain sufficient minerals for absolute dating. In the Atacama Desert, tephra layers occur in various types of archives and on various time-scales due to the persistent volcanic activity of the Andes. However, a tephrostratigraphic framework, which sets the tephra layers in a stratigraphic and chronological order and shows the regional dispersal of individual tephra layers is currently lacking. Within the CRC1211 "Earth-Evolution at the dry limit", the project TephATA aims at setting up a regional tephra database to develop the first comprehensive tephrostratigraphic framework for the Atacama Desert. The TephATA database is currently integrated as a web-based part of the CRC1211 database and uses an extended IGSN metadata schema. TephATA combines the morphological description of tephra samples, existing and new chronological as well as stratigraphical information of tephra layers in combination with their (glass) geochemical compositions. Thus, TephATA enables the collection of all sample related data in just one repository and further offers tools to test tephra correlations (similarity coefficient, oxide plotting tool). This will simplify the process of establishing reliable correlations and thus substantially help to improve the tephrostratigraphy of the Atacama and adjacent regions. Particularly widespread tephra layers will act as independent tie-points for the synchronization of the various marine and terrestrial sedimentary records investigated within the CRC1211. The TephATA repository has the power to become a catalogue for the volcanic eruptive history of the adjacent volcanic centers and thus provides crucial information for volcanic hazard assessment, such as the frequency of explosive eruptions and the spatial dispersal of their pyroclastic products.

Keywords: tephrochronology, Atacama, tephra database, geochemical fingerprinting, volcanic eruptive history.

Financing: This project is funded by the German Research Foundation (DFG, project number: 268236062) as part of the sub-project A02 of the Collaborative Research Center (CRC) 1211 "Earth- Evolution at the Dry Limit" (grant nos. SFB 1211/1 2016 and SFB 1211/2 2020).

Precipitation changes of the central Atacama Desert since the Miocene as reconstructed from clay pan records of the Coastal Cordillera/ N Chile

Volker Wennrich¹, Bárbara Vargas-Machuca¹, Niklas Leicher¹, Stephanie Scheidt¹, Benedikt Ritter¹, Julia Diederich-Leicher¹, Dominik Brill², Bárbara Blanco Arrué³, Pritam Yogeshwar³, Mark Reyers³, Rafael Carballeira⁴⁻⁵, Roberto Bao Casal⁴, Richard Albert⁶, Eduardo Antonio Campos Sepúlveda⁷, Antonio Maldonado⁸, Florian Kerber⁹, Tibor Dunai¹, Martin Melles¹

(1) University of Cologne, Institute of Geology and Mineralogy, Germany

(2) University of Cologne, Geographical Institute, Germany

(3) University of Cologne, Institute of Geophysics and Meteorology, Germany

(4) University of A Coruña, Faculty of Science, Spain

(5) University of Valencia, Institute for Biodiversity and Evolutionary Biology, Spain

(6) FIERCE – Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe-University Frankfurt, Germany

(7) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(8) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, Universidad de La Serena, La Serena, Chile

(9) European Southern Observatory, Garching near Munich, Germany

Hyperaridity is a major limitation of Earth-surface processes and biological activity in the Atacama Desert of N Chile, one of the oldest and the driest deserts on Earth. But even the hyperarid core of the Atacama Desert of N Chile has experienced severe precipitation events, like during the floods in 2015. On geological timescales, the overall aridity that is postulated to have lasted at least since the early Miocene was punctuated by distinct pluvial events. Such wetter conditions, e.g. during the Miocene, caused widespread lake-formation in the Central Depression and Coastal Cordillera, but also caused amplified surface processes, changes in vegetation dynamics, and enabled the dispersal of species. Unfortunately, due to the limited number and heterogeneous appearance of climate archives from the central Atacama, its longer-scale precipitation history is still a matter of controversy.

This study focuses on long-term continuous (Miocene-Pleistocene) paleoclimatic/ environmental records from the hyperarid core of the Atacama Desert. Therefore we investigate endorheic clay pans in the Coastal Cordillera mostly formed by blocking of drainage by tectonic movement that host up to 170 m thick sediment records. The clay pans under study are located along a latitudinal transect across the hyperarid core of the Atacama, and thus, are assumed to have recorded local and regional precipitation variations on different timescales.

The investigated sequences exhibit significant changes in the sedimentological, geochemical, and mineralogical properties during the Pleistocene mainly triggered by precipitation changes. Diatom and phytolith remains preserved in these records clearly point to significant water bodies and significant vegetation cover during pluvial phases. Preliminary data of Miocene sediments recovered from one of the sites, in contrast, imply permanent lacustrine conditions pointing to a major hydrological and/or climatic change in Coastal Cordillera. The results shed a new light on the timing, frequency, and the driving mechanisms of the intervening pluvial phases.

Keywords: Atacama Desert; hyperaridity, clay pans, paleoclimate, precipitation.

Financing: This project is funded by the German Research Foundation (DFG, project number: 268236062) as part of the sub-project A02 of the Collaborative Research Center (CRC) 1211 "Earth- Evolution at the Dry Limit" (grant nos. SFB 1211/1 2016 and SFB 1211/2 2020).

The Condor Pluton: toward the identification of shallow magmatic reservoirs beneath Miocene volcanic calderas in southernmost South America

Mauricio Roberto Calderón Nettle¹, Cristóbal Ramírez de Arellano², Francisco Hervé²⁻³, Christopher M. Fanning⁴, Julie C. Fosdick⁵, Robert J. Pankhurst⁶

(1) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Ingeniería, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Ingeniería, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Australian National University, Canberra, Australia

(5) University of Connecticut, Department of Earth Sciences, Connecticut, United State of America

(6) British Geological Survey, Visiting Research Associate, United Kingdom

The Miocene stratigraphy of the Magallanes Foreland Basin in southernmost South America records episodes of explosive silicic volcanism (Fosdick et al., 2011; Velásquez, 2016; others). The source of such deposits is thought to be located near the Pacific coast where the Patagonian Batholith crops out. Miocene plutonic rocks within the batholith have been identified near its eastern margin (Hervé et al., 2007), with chemical/isotopic signatures signaling a mixture of mantle- and crustal-derived components generated in a supra-subduction system (Hervé et al., 2007; Fanning, et al 2010; Ramírez de Arellano, 2022). Recent field work, petrography, U-Pb zircon geochronology and (U-Th)/He thermochronology of zircon and apatite, indicate a Miocene composite pluton of kilometeric dimensions that was emplaced in the upper continental crust.

At Estero Condor, tonalites and granodiorites of Miocene age (Ramírez de Arellano et al., 2021) intrude a succession of volcanic and volcanoclastic rocks of andesitic composition with characteristic pyroxene and amphibole phenocrysts. The presence of amphibole rules out association with the Rocas Verdes ophiolitic complexes (Muller et al, 2022), the lithostratigraphic unit to which this belt of rocks is currently assigned. Tonalites and diorites are reported in the eastern margin, highlighting the existence of two or more magmatic components in the evolution of the magmatic reservoir. Felsic compositions, such as granodiorites and tonalites, dominate on the western side, whereas diorites predominate in the east. A similar distribution of lithological groups is recorded at Golfo Xaultegua, where Miocene plutonic rocks were reported by Bruce et al (1991). Mafic dykes of diorite/andesite composition are present in most visited outcrops. In this work, we present preliminary geochemical, geochronological and thermochronological data of more Miocene plutonic rocks which allow definition of an intrusive body that we name the Condor Pluton.

New zircon U-Pb crystallization ages from granodiorites and diorites vary in the range 20 to 17 Ma, corresponding to the Burdigalian Age (Lower Miocene; according to Cohen et al., 2013; updated). Preliminary U-Th-He ages show a similar range of cooling ages, suggesting fast cooling and emplacement at shallow crustal depths (ca. 3 km, assuming a typical volcanic arc geothermal gradient of 30-40°C/km). Apparently the tonalite and granodiorite rocks are older than the diorites. The former are contemporaneous with pumice-bearing silicic pyroclastic rocks reported near Punta Arenas (Velásquez, 2016) and in the Magellan Strait (Ramírez de Arellano et al., 2021), which were deposited in a releasing bend of the Magallanes-Fagnano Fault System. It is hypothesized that the Condor Pluton records the magmatic evolution of a shallow batch of magma as part of an extra-basin caldera that produced pyroclastic products in southern Patagonia. Although detailed mapping of this body is a task for future work, this contribution presents evidence of its lithological components and how these can be linked to the evolution of regional-scale Burdigalian caldera systems.

Palabras Clave: Burdigalian, composite pluton, caldera.

Financiamiento: Fondecyt Grant 1211906 (ANID).

Agradecimientos: We thank Hugo Cárdenas and the crew of the Marypaz II for providing logistical support and professional maritime transport to these extreme areas

Referencias:

- Bruce, R.M., Nelson, E.P., Weaver, S.G., Lux, D.R. (1991). Special Paper, Geological Society of America, vol. 265, pp. 1–12.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013). updated). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.
- Fanning, C. M., Hervé, F., Pankhurst, R.J., Calderón, M., Yaxley, G., Holden, P. (2010). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(12), A279-A279.
- Fosdick, J.C., Romans, B.W., Fildani, A., Bernhardt, A., Calderón, M., Graham, S.A. (2011). *GSA Bulletin* 123 (9/10), 1679–1698.
- Hervé, F., Pankhurst, R., Fanning, C., Calderón, M., Yaxley, G. (2007). *Lithos* 97, 373–394.
- Muller V.A.P., Calderón M., Cury L., Sternai P., Sue C. (2022). XXI Congreso Geológico Argentino. Puerto Madryn, Chubut. Actas electrónicas.
- Ramírez de Arellano, C., Calderón, M., Rivera, H., Valenzuela, M., Fanning, C.M., Paredes, E. (2021). *Journal of South American Earth Sciences*. 110, 103238.
- Ramírez de Arellano, C., Calderón, M., Hervé, F., Rojo, D., Babinski, M. (2022). XII South American Symposium on Isotope Geology, SSAGI. Santiago, Chile.
- Velásquez, A. (2016). Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Resultados preliminares de la estratigrafía de la Laguna del Toro, Región de Magallanes, Chile

Alejandro Espinoza Torres¹, Mauricio Calderón Nettle¹, Linda Vidal Murillo², Teresa Torres Gonzáles³

(1) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Av. la Plaza 680, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Casillas 1004, Santiago, Chile

En la Laguna del Toro, ubicada al sur de Cerro Palomares, en la Provincia de Laguna Blanca, región de Magallanes, aflora una gran variedad de rocas estratificadas, conformando principalmente sucesiones volcánicas y volcano-sedimentarias, descritas como unidades de gravas y limos con ignimbritas intercaladas, cuyas edades están definidas para el Mioceno Inferior-Medio (Sernageomin 2002; mapa geológico 1:1.000.000). Sin embargo, estos afloramientos no están asignados a ninguna unidad geológica formalmente. En este contexto, se presentan resultados preliminares del trabajo de campo y la caracterización de un conjunto de estratos aflorantes en el borde oriental del extremo nor-occidental de la Laguna del Toro, en donde el manto de las capas es de bajo ángulo hacia el norte. Mediante el estudio petrográfico y análisis de facies de cuatro columnas estratigráficas (de máximo 20 metros de espesor), se busca determinar el ambiente deposicional y asignarlos a algún miembro o formación geológica formal. En el sector meridional (niveles basales) afloran facies de tefra con troncos fósiles (*Nothofagus?* sp.); facies de areniscas amarillentas, con importante presencia de estratificación cruzada, marcada por líticos volcánicos (grava fina) y fragmentos de pómez (lapilli); y facies de lapilli acrecional. El sector norte (niveles superiores) se caracteriza por la presencia de facies de areniscas amarillentas oscuras con estratificación cruzada, marcada por fragmentos de escorias basálticas y andesíticas (grava fina), y presencia de troncos fósiles aislados; facies de conglomerados con clastos andesíticos y basálticos, con imbricación y estratificación cruzada a gran escala; y facies de grano más fino, posiblemente tefra, con escasos troncos fósiles. Los resultados preliminares sugieren que los depósitos del sector de la Laguna del Toro registran un evento volcánico bimodal, con componentes efusivos máficos y explosivos félsicos, depositados en un régimen de alta a moderada energía, consistente con un ambiente de dominio fluvial. Por lo anterior, se propone una correlación con el Miembro Superior "Penitente" de la Formación Palomares (Velásquez, 2016).

Palabras Clave: Facies, Troncos fósiles (*Nothofagus*), Sucesión volcano-sedimentaria, Formación Palomares, Laguna del toro.

Financiamiento: Fondecyt 1211906 (ANID).

Referencias:

- SERNAGEOMIN, 2002. Mapa geológico de Chile. Carta Geológica de Chile M61, Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:1000000.
- Velásquez, A.I., 2016. Condiciones depositacionales de la Formación Palomares, XII Región de Magallanes. Memoria para optar al título de Geólogo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 155 pp. (inédito).

Brittle deformation linked to Neogene tectonic activity along the NW-trace of the Magallanes-Fagnano Fault System: field data from Bahía Xualtegua, southernmost South America

Gonzalo Galaz¹, Valentina Villalba², Mauricio Calderón², Orietta Nicolis³, Diego Rojo⁴, Pedro Parga², Mirko Guzmán⁵, Pierre-Yves Descote⁵

- (1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Copiapó, Chile
 (2) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile
 (3) Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Viña del Mar, Chile
 (4) Universidad Arturo Prat, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Iquique, Chile
 (5) Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

The Magallanes-Fagnano Fault System (MFFS) can be traced across a distance of ca. 1000 km, from the triple junction of tectonic plates near the Chilean Pacific coast, through the Magallanes Strait, continuing to Fagnano lake and reaching the Argentinian Atlantic off-shore. Differences in both kinematics and temporality of deformation have been reported along its trace, nevertheless, most authors agree that this fault system record a sinistral transtensional regime since the Oligocene times (~30 Ma; e.g., Dalziel, 1989; Klepeis, 1994; Ghiglione and Ramos, 2005). The amount of cumulative relative displacements reported in Tierra del Fuego could have reached 30-25 km (Klepeis, 1994; Olivero and Martinioni, 2001) and up to ca. 80 km (Winslow, 1982). This transform plate boundary is actually active and experiencing a sinistral strike-slip relative velocity of 6.6 ± 1.3 mm/yr (GPS data; Smalley et al., 2003). Small, discrete and young pull apart basins along its extensive and irregular trace in Tierra del Fuego (e.g. Lodolo et al., 2003; Ghiglione and Ramos, 2005), filled with Neogene and Quaternary continental sediments. Motivated by the recognition of such features in the north-western segment of the MFFS across the Patagonian batholith, this study provides structural data collected along the southern shore of Golfo Xualtegua (53.20°S).

From satellite images, the NW-segment of the MFFS is characterized by regional lineaments, defined by nearly rectilinear fjords and valleys. Taken together these define a fracture network dominated by first order NW-SE-trending features, which are interconnected with others of N-S and E-W orientations. Golfo Xualtegua, located north of the N50W-trending main trace of the fault system, shows a rhombohedral geometry defined by E-W and NW-SE-trending lineaments.

Based on lithological features and available geochronological data, the older plutonic rocks (ca. Upper Cretaceous) are restricted to the west (at Grupo Santa Ana Islands and Ensenada Chulengo) and correspond to hornblende-biotite tonalites and two-mica granodiorites showing a weak planar magmatic fabrics defined by preferred orientation of mafic minerals and enclaves. Younger plutonic rocks (Miocene) crop out to the east (at Ensenada Colo Colo, Punta Frontón and Bahía Retroceso) and are constituted by diorites, tonalites and granodiorites with variable proportion of clinopyroxene, hornblende and biotite. In every visited outcrop, granitoids are intruded by mafic dikes of mainly N50-60W, N20-30E and nearly E-W orientations.

Based on the Riedel's shear criteria and considering that the regional principal stress during the Neogene was nearly N50E (Diraison et al., 1997), an overall sinistral tectonic regime along the N50W-trending main trace of the MFFS prevailed. In this scenario, the kinematic analysis indicates that the emplacement of mafic dykes in Miocene rocks was controlled by Riedel shear faults, most of which present a secondary normal slip component. This would support a phase of transtensional deformation in the Miocene volcanic arc.

Keywords: Magallanes-Fagnano Fault System, Neogene, Golfo Xualtegua.

Financing: This study was financed through project FONDECYT 1211906.

Acknowledgments: Field assistance was provided by A. Álvarez, T. Montecinos y E. Salas. Thanks for the hospitality of the captain and the crew of the Marypaz II ship, as well as Hostal Martita in Punta Arenas.

References:

- Dalziel, I.W.D., 1989. Tectonics of the Scotia Arc, Antarctica. Field Trip Guide. AGU, Washington, D. C., v. T180, 206 p.
- Diraison, M., Cobbold, P., Gapais, D., Rosello, E. 1997. Magellan Strait: Part of a Neogene rift system. *Geology* 25, 703-706.
- Ghiglione, M., Ramos, V., 2005. Progression of deformation and sedimentation in the southernmost Andes. *Tectonophysics* 405(1-4), 25-46.
- Klepeis, K.A., 1994. The Magallanes and Deseado fault zones: major segments of South American-Scotia transform plate boundary in southernmost South America, Tierra del Fuego. *J. Geophys. Res.* 99, 22001-22014.
- Lodolo, E., Menichetti, M., Bartole, R., Ben-Avraham, Z., Tassone, A., Lippai, H., 2003. Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America). *Tectonics* 22(6), 1076.
- Olivero, E.B.; Martinioni, D.R., 2001. A review of the geology of the Argentinian Fuegian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 175-188.
- Smalley, R., Jr., Kendrick, E., Bevis, M.G., Dalziel, I.W.D., Taylor, F., Lauría, E., Barriga, R., Casassa, G., Olivero, E., Piana, E., 2003. Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia-South America plate boundary in eastern Tierra del Fuego. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 4(9), 1070.
- Winslow, M.A., 1982. The structural evolution of the Magallanes basin and neotectonics in the southernmost Andes. In: Craddock, C. (Ed.), *Antarctic Geosciences*. University of Wisconsin Press, Madison, 143-154.

Depocentros Cenozoicos de los Andes Australes durante la apertura del Pasaje de Drake

Matías Ghiglione¹, Rocío Gallardo-Jara¹, Mauricio Calderón²

(1) Universidad de Buenos Aires, Carrera de Geología, Argentina

(2) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Santiago, Chile

Cretaceous-Cenozoic interaction between the South America and Antarctica plates has been a major driver of kinematics in the Southernmost Andes, imprinting extensional and strike-slip deformation within the foreland in Tierra del Fuego. Late Cretaceous basin inversion and transpression along the Beagle channel was due to their left-lateral relative displacement. Orogen building continued during the Paleogene, together with progression of sedimentation in the associated Austral-Malvinas marine foreland basin system and depocenter migrations. The Eocene early opening of the Drake passage due to Antarctica separation, involved the combination of strike-slip and extensional tectonics, superposed to the previously consolidated orogen. A series of latest Paleocene–early Eocene fault-related extensional depocenters can be recognized in the Austral and Malvinas basins, which represent a direct indication of continental lithospheric stretching preceding the opening of embryonic basins in the West Scotia Sea. A middle-late Eocene compressional stage followed, characterized by rapid migration of the orogenic front and establishment of a widespread wedge-top depocenter. Since the Oligocene inception of oceanic spreading in the West Scotia Sea, strike-slip deformation has dominated, concentrated along the North Scotia ridge-Magallanes-Fagnano fault zone. As a result, late Cenozoic continental pull-apart basins are registered in a hinterland position. Coeval retroarc Miocene sedimentation includes an important continental volcanoclastic component and distributary system funneling sediments to deep marine basins. In this context, tectonic loading, dynamic subsidence, and transtension/pull-apart extension seems to be superposed; alternatively, they may be partitioned processes and geographically distributed. We present a synthesis of this history of changing tectonic regimes and depocenter migration in the southernmost Andes and the Austral basin from and well and discuss the implication of new detrital zircons provenance data.

Keywords: Pasaje de Drake, Mar de Scotia.

Financing: Fondecyt Grant 1211906.

Tectónica compresiva asociada al cierre de la cuenca de Rocas Verdes y a la orogenia fueguina: Evidencias en base a datos de AMS en rocas cretácicas de Isla Navarino, Región de Magallanes, Chile

Roberto González¹, Fernando Poblete¹⁻², Matías Peña³, Felipe Tapia⁴, Esteban Salazar⁵, Ricardo Velásquez⁶, Joaquín Bastías⁷,
Javier Rodrigo⁸, Paul Duhart⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Chile, Rancagua, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(4) Universidad de Buenos Aires. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Departamento de Ciencias Geológicas, Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, La Paz 406, Puerto Varas, Chile

(6) Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(7) Trinity College Dublin, Department of Geology, College Green, Dublin 2, Ireland

(8) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

La evolución tectónica de la Cuenca de Rocas Verdes estuvo marcada por una fase extensional con formación de corteza oceánica asociada al quiebre de Gondwana durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano [1], y un período compresivo durante el Cretácico Tardío que llevó a su cierre, involucrando un proceso de obducción [2]. Este período estaría asociado a rotaciones tectónicas antihorarias, sugiriendo cambios en la dirección y magnitud del acortamiento durante estos eventos [3]. La caracterización de la evolución estructural de dicho proceso en la parte interna del orógeno fueguino aún es materia de discusión.

Isla Navarino se encuentra en la zona interna del orógeno fueguino (55°S, 68°W). La unidad litoestratigráfica predominante es la Formación Yahgan (Cretácico Inferior), una secuencia sedimentaria turbidítica que sobreyace al Complejo Ofiolítico Tortuga (Jurásico Superior), una secuencia pseudoofiolítica expuesta al suroeste de la isla (sector Bahía Douglas). Estas unidades son interpretadas como el relleno sedimentario y el fondo oceánico, respectivamente, de la Cuenca de Rocas Verdes [4]. La Formación Yahgan es intruida por, al menos, tres unidades ígneas; los Sills Microdioríticos de Dientes de Navarino (ca. 100 Ma), el Complejo Plutónico Castores (ca. 90-85 Ma) y las Monzonitas Samantha (ca. 65 Ma) [5], y es afectada por una intensa deformación, por lo que su estudio es relevante para entender la tectónica involucrada en el desarrollo del orógeno fueguino y en el cierre de la Cuenca de Rocas Verdes.

Los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) permiten determinar la fábrica magnética de las rocas. Esta se puede representar por un elipsoide de susceptibilidad el cual, a su vez, se correlaciona con el elipsoide de deformación, lo que convierte al AMS en una importante herramienta geofísica no destructiva para el estudio de la petrofábrica de rocas en zonas deformadas [6]. En esta contribución presentamos resultados de AMS en 45 sitios (498 especímenes) pertenecientes a rocas expuestas en la zona norte, centro y suroeste de Isla Navarino. Se perforaron rocas estratificadas de la Formación Yahgan, rocas del Complejo Ofiolítico Tortuga, y de las unidades ígneas que intruyen a la Formación Yahgan. Los análisis se llevaron a cabo utilizando un susceptibilímetro Kappabridge KLY-3S, del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Chile, y del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Rennes 1, Francia.

Resultados preliminares muestran que las rocas en la zona noroeste de la isla (Complejo Plutónico Castores) alcanzan anisotropías del orden del 10-25% ($P' \sim 1.20$), valores que disminuyen progresivamente hacia el oriente y hacia el sur, hasta anisotropías del 1-5% ($P' \sim 1.03$) en el sector Bahía Douglas. En las rocas intrusivas se observan mayoritariamente fábricas oblatas (foliación magnética), mientras que las rocas volcánicas del sector suroeste presentan fábricas prolatas (lineamientos magnéticos). En el Plutón Castores, principal constituyente del Complejo Plutónico Castores, se observa un plano de foliación magnética de rumbo E-W y manto de $\sim 40^\circ$ hacia el sur. Esta orientación de la foliación es concordante con la estratificación de la Formación Yahgan, así como con sus *trends* estructurales y con las fallas que la afectan (Alenghi, Guanaco); dichas estructuras mantean hacia el sur con rumbo subparalelo a la E-W [7]. Por otro lado, en el Complejo Ofiolítico Tortuga, tanto el lineamiento magnético de rocas volcánicas (lavas y *pillow* lavas) como el rumbo de la foliación magnética en rocas intrusivas (diques microdioríticos y gabros) tienen una orientación subparalela a la E-W, en concordancia con la estratificación de la Formación Yahgan en el sector de Bahía Douglas. Estos resultados preliminares serán complementados con datos de muestras obtenidas en la parte central de la isla y su costa norte, que se encuentran en proceso de análisis.

En conjunto con las variaciones en la magnitud de anisotropía, la concordancia entre los patrones estructurales y la fábrica magnética sugieren que ésta es de origen tectónico, asociada a esfuerzos compresivos perpendiculares a las foliaciones y lineamientos magnéticos observados, los cuales se orientan paralelos o subparalelos a la E-W. Pese a la diferencia de la magnitud de anisotropía que existe entre los sitios del Complejo Plutónico Castores y los del Complejo Ofiolítico Tortuga, los datos preliminares de AMS aquí presentados permiten interpretar una dirección de acortamiento norte-sur para las rocas estudiadas en Isla Navarino, resultados que son contrastables con datos paleomagnéticos que sugieren cambios en la dirección y magnitud del acortamiento durante los eventos propios del cierre de la Cuenca de Rocas Verdes y de la orogenia fueguina.

Palabras Clave: AMS, Isla Navarino, Cuenca de Rocas Verdes, Obducción.

Financiamiento: Esta investigación ha sido financiada por el proyecto de instalación "Evolución tectónica y paleogeográfica de Isla Navarino" de la Universidad de Chile, el Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Universidad de O'Higgins.

Agradecimientos: Agradecemos a Cecilia, por su calidez y apoyo en las campañas de terreno, y a la tripulación del PSG-73 Aspirante Isaza (Armada de Chile) por apoyo logístico en campaña a Bahía Douglas, Isla Navarino.

Referencias:

- [1] Bastías, J., Spikings, R., Riley, T., Ulianov, A., Grunow, A., Chiaradia, M., & Hervé, F. (2021). A revised interpretation of the Chon Aike magmatic province: Active margin origin and implications for the opening of the Weddell Sea. *Lithos.* <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106013>.
- [2] Torres Carbonell, P. J., Dimieri, L. V., Olivero, E. B., Bohoyo, F., & Galindo-Zaldívar, J. (2014). Structure and tectonic evolution of the Fuegian Andes in the framework of the Scotia Arc development. *Glob. Planet.* [doi:10.1016/j.gloplacha.2014.07.019](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.07.019).
- [3] Poblete, F., Roperch, P., Arriagada Ortega, C., Ruffet, G., de Arellano Ramírez, C., Hervé Allamand, F., & Poujol, M. (2016). Late Cretaceous-early Eocene counterclockwise rotation of the Fuegian Andes and evolution of the Patagonia-Antarctic Peninsula system. *Tectonophysics.* <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.025>.
- [4] Dalziel, I. (1981). Back-arc extension in the southern Andes. *Philos. trans., Math. phys. eng. sci.* <https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0067>.
- [5] Velásquez, R., Bastías, J., Salazar, E., Poblete, F., González-Guillot, M., Chew, D., Peña, M., Tapa, F., & Drakou, F. (2023). Magmatic arc evolution during the tectonic closure of the Rocas Verdes basin: insights from Cretaceous-earliest Paleocene intrusive rocks of Navarino Island (55°S), Fuegian Andes. *J. Geol. Soc.* <https://doi.org/10.1144/jgs2022-163>.
- [6] Soto, R., Casas-Sainz, A. M., Oliva-Urcia, B., & Román-Berdiel, T. (2023). Guía rápida para el estudio de rocas deformadas a partir del análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM). *Rev. Soc. Geol. Esp.* <https://doi.org/10.55407/rsge.94884>.
- [7] Salazar, E., Duhart, P., Opazo, E., Velásquez, R., Peña, M., Poblete, F., & Tapia, F. (2021). Avances en la Geología de la parte centro-norte de la Isla Navarino (55°S), Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Petrogenesis and geochemistry of mafic dikes located in proximity of South Patagonian and Fuegian Batholiths

Mirko Guzmán Aceituno¹, Cristóbal Ramírez de Arellano¹, Mauricio Calderón Nettle²

(1) Universidad Andrés Bello, Departamento de Ingeniería, Facultad de Geología, República 252, Santiago, Chile

(2) Universidad del Desarrollo, Departamento de Ingeniería, Facultad de Geología, Av. Plaza 680, Santiago, Chile

Mafic dikes provide an opportunity to explore the chemistry of primary magmas and the processes that control the magma genesis. In the southernmost western margin of Patagonia (between 52°S and 54°S), a variety of mafic to intermediate dikes crosscut the batholith, with Mesozoic and Cenozoic ages (Hervé et al. 2006; and unpublished data). At this latitude, the Magallanes-Fagnano fault, with a NW-SE trend, separates the South American from the Scotia plate. Some authors informally use this structure to limit the Southern Patagonian Batholith (SPB), to the North, and Fuegian Batholith (FB), to the South.

In this work, we present analyses from 16 dikes that crosscut the SPB and FB (8 at each side). Here we summarize field observations, thin section petrography and whole rock geochemistry of major and trace elements (ICP-OES and ICP-MS, performed at Actlabs, Canada). We discuss this data to explore the petrogenetic processes that take place at both domains.

The dikes located at the NE domain (i.e. crosscutting the SPB) consist of 1 basalt, 1 porphyritic andesite, 1 microdiorite, 1 porphyritic microdiorite and a lamprophyre (spessartite) and 3 dikes with an undefined lithology. All dikes present a variable degree of alteration, with hydrated minerals like, chlorite, epidote, titanite, sericite, tremolite-actinolite. Undefined dikes present a metamorphic mineralogy that obliterates the primary texture. Six dikes crosscut plutonic rocks from SPB with ages between 22 and 18 Ma, including errors (SHRIMP U-PB zircon ages, unpublished data), one of undefined dike crosscut a plutonic unit with ages 126 ± 2.6 Ma (Ar-Ar hornblende ages, Bruce et al, 1991) and, in the case of a porphyritic andesite, it crosscut a volcano-sedimentary succession dated between 26 and 18 Ma, including errors (SHRIMP U-Pb zircon ages, unpublished data).

On the other hand, the dikes from the SW domain (crosscutting the FB) consist of 2 porphyritic basalts, 1 microdiorite, 2 porphyritic microdiorites, 1 dacitic dikes and 2 undefined dikes (with metamorphic textures). In this case, the dikes crosscut plutonic units from the Fuegian Batholith with ages between 126 and 75 Ma, including errors (SHRIMP U-PB zircon, Hervé et al 2006 and unpublished data).

The geochemistry of the dikes reveal a suite that from basaltic to dacitic rocks, that belong to a medium K calcalkaline trend with large ion lithophile elements enrichment (e.g. La/Yb 2.4-9.8), high Pb (5-14 ppm), and depletion in high field strength elements (e.g. Zr/Y 2.8-6.3, Nb 0.9-7.7 ppm, P₂O₅ wt% 0.13-0.27 and TiO₂ wt% 0.8-1.4).

The dikes from NE and SW domains show a similar REE pattern (La/Yb < 9 and Dy/Yb 1.6-2.1). An exception for this signature is the lamprophyre from the NE domain. This lamprophyre presents K₂O wt% > 1.5 and an oceanic island basalt trace element signature (e.g. La/Yb 64, Dy/Yb 3, Zr/Y 14 and Nb 62 ppm).

According to these results, despite the petrographic variability of these dikes, there are no geochemical features that allow a distinction between both domains. This suggests that the petrogenetic processes related to the Miocene (post 18 Ma) magmatic arc were not strongly influenced by the tectonic discontinuity between Scotian and South American plates.

Keywords: South Patagonian Batholith, Fuegian batholith, Magallanes-Fagnano fault, Petrogenesis, Magmatic Dikes.

References:

- Anguita, N.; 2010. Petrogénesis de Diques Lamprofídicos Postectónicos y su Relación con el Magmatismo Shoshonítico Cretácico de la Formación Barros Arana y el Complejo La Pera, Magallanes, XII Región, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile: 237.
- Bruce, R.M., Nelson, E.P., Weaver, S.G., Lux, D.R.; 1991. Temporal and spatial variation in the southern Patagonian batholith: constraints on magmatic arc development. In: Harmon, R.S., Rapela, C.W. (Eds.), Andean Magmatism and its Tectonic Setting. Special Paper, Geological Society of America, vol. 265, pp. 1-12.
- Hervé F, Pankhurst R, Fanning C, Calderón M, Yaxley G.; 2006. The South Patagonian Batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin. Lithos 97:373-394.
- Ramírez de Arellano, C., Calderón, M., Rivera, H., Valenzuela, M., Fanning, M., Paredes, E.; 2021. Neogene Patagonian magmatism between the rupture of the Farallon plate and the Chile Ridge subduction.

Granito Svea: Magmatismo devónico-carbonífero en Cordillera de Darwin, Tierra del Fuego, Chile

Mauricio Mella¹, David Quiroz¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina Técnica de Puerto Varas, La Paz 406, Puerto Varas, Chile

La Cordillera de Darwin es un macizo que define la porción oriental del orocline de los Andes Fueguinos en Tierra del Fuego. Se compone de un núcleo de rocas metamórficas agrupadas en el Complejo Metamórfico Cordillera de Darwin – CMCD (Kohn *et al.*, 1995), en Chile, y Formación Lapataia (Caminos *et al.*, 1981), en Argentina. Este complejo se compone, principalmente, de metapelitas, metasamitas, esquistos verdes (metabasaltos), con ocurrencias menores de gneises (Hervé *et al.*, 2010). El CMCD es la única suite de rocas metamórficas de alto grado en el sur de Chile con esquistos de estaurilita - sillimanita – cianita en facies anfibolita (Kohn *et al.*, 1995). Edades en circones detríticos en metasamitas en el Canal Beagle (Bahía Lapataia) indican una edad máxima de sedimentación pérmica (ca. 267 Ma; Cao *et al.*, 2022) con un *pick* principal de proveniencia del Devónico Superior cerca del límite Carbonífero (ca. 350-355 Ma; Cao *et al.*, 2022). En rocas que afloran en los fiordos que nacen desde la Cordillera de Darwin se han datado circones detríticos con edades máximas de sedimentación desde pérmicas hasta jurásicas, con algunos *picks* devónicos y carboníferos (Hervé *et al.*, 2010). En los últimos años Sernageomin ha levantado información en el flanco oriental de la Cordillera de Darwin (ruta Y-85) con mapeo 1:100.000. En estas campañas se accedió al monte Svea (Quensel, 1910), denominado en este trabajo Granito Svea. Esta unidad corresponde a un plutón que aflora como una cuña tectónica asociada a zonas milonítica en metaturbiditas de la Formación Tobífera. En el monte Svea se observó un contacto en inconformidad bajo cuarcitas y metaconglomerados de edad indefinida. Su mineralogía, obtenida por SEM, y geoquímica muestra que es un granito peraluminoso ($\text{SiO}_2=73\%$; $\text{A/CNK}>1$) de cuarzo-albita-ortoclasa-moscovita, con circón-titanita-apatito como accesorios, con epidota rica en REE, xenotima y clorita secundaria. En asociación con este granito existe un ortogneis de cuarzo-ortoclasa-moscovita posiblemente asociado a deformación del granito. Se han obtenido dos edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita en el granito y el ortogneis en el Laboratorio Geocronológico del Sernageomin. En el granito se obtuvieron edades *plateau* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $363,4 \pm 1,3$ Ma (MSWD *plateau*=0,74 con 7/8 pasos y edad isócrona concordante) y el ortogneis entregó de una edad *plateau* de $345,9 \pm 1,5$ Ma (MSWD *plateau*=2,8 con 6/8 pasos y edad isócrona concordante). Estos datos muestran una edad de enfriamiento devónica a carbonífera para estas rocas, lo que se puede interpretar como edad de cristalización y/o edad de metamorfismo. En este punto, los datos petrográficos y mineralógicos muestran que el Granito Svea se compone de moscovitas primarias en equilibrio con ortoclasa y cuarzo, además de patrones de *plateau* planos y con bajo error (MSWD=0,74), lo que nos hace inclinarnos por edad de enfriamiento cercana a la de cristalización. Este es el primer hallazgo de un granito de posible edad devónica en Tierra del Fuego y, en particular, en la Cordillera de Darwin. Si esta hipótesis la corroboramos con datos U-Pb en circones (en proceso) nacen diversas preguntas sobre el basamento al sur de la Falla Magallanes – Fagnano, posiblemente diferente al basamento de Tierra del Fuego como sugirieron Hervé *et al.* (2010). Estas edades indican que en el Devónico Superior este granito estaba en zonas corticales someras (edad del granito) y que pudo tener una deformación y metamorfismo en el Carbonífero Inferior (edad en el gneis). Además, es notable que el sistema isotópico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ no fue afectado por el metamorfismo pérmico, del Complejo Igneo y Metamórfico de Tierra del Fuego, ni por el metamorfismo Cretácico Superior de la Cordillera de Darwin y Cuenca de Rocas Verdes. Esto es apoyado por las edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ reportadas aquí, que son concordante con los *picks* devónicos y carboníferos reportados en los esquistos de la Formación Lapataia en Argentina (Cao *et al.*, 2022) y en el CMCD en el Fiordo Parry (Hervé *et al.*, 2010). Por tanto, estos datos sugieren que el Granito Svea ya era fuente de los sedimentos del CMCD y Formación Lapataia antes del alzamiento Cretácico de la Cordillera de Darwin (Kohn *et al.*, 1995). Las últimas reconstrucciones paleogeográficas del Devónico sugieren que la Cordillera de Darwin estaba junto a la Península Antártica (Riley *et al.*, 2023), lo que abre la posibilidad, aún por investigar, de que el Granito Svea esté relacionado con los granitoides y gneises devónicos del complejo metamórfico Target Hill en la Península Antártica.

Palabras Clave: Cordillera de Darwin, Granito, Devónico.

Financiamiento: La presente contribución se realizó por la Oficina Técnica de la subdirección de Geología en Puerto Varas con aportes sectoriales del Plan Nacional de Geología Básica del Servicio Nacional de Geología.

Agradecimientos: Se agradece al Laboratorio de Sernageomin, a la Oficina Regional del Magallanes por su apoyo logístico, a los colegas de ENAP y Francisco Hervé por sus discusiones y aportes.

Referencias:

- Caminos, R.; Haller, M.J.; Lapido, O.; Lizuain, A.; Page, R.; Ramos, V. 1981. Reconocimiento geológico de los Andes Fueguinos, territorio Nacional de Tierra del Fuego. In Congreso Geológico Argentino, No. 8: 759-786.
- Cao, S.; Torres Carbonell, P.; Bordese, S.; Lovecchio, J. 2022. Early rifting during marginal basin development: Petrography, microstructure, and detrital zircon U-Pb geochronology of the Lapataia Formation, Argentine Fuegian Andes. *Basin Research* 34 (00): 1-21.
- Hervé, F.; Fanning, C.M.; Pankhurst, R.J.; Mpodozis, C.; Klepeis, K.; Calderón, M.; Thomson, S.N. 2010. Detrital zircon SHRIMP U-Pb age study of the Cordillera Darwin Metamorphic Complex of Tierra del Fuego: Sedimentary sources and implications for the evolution of the Pacific margin of Gondwana. *Journal of the Geological Society* 167 (3).
- Kohn, M.J.; Spear, T.M.; Harrison, T.M.; Dalziel, W.D. 1995. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and P-T-t paths from the Cordillera Darwin metamorphic complex, Tierra del Fuego, Chile. *Journal of Metamorphic Geology* 13: 251-270.
- Quensel, P.D. 1910. Geologisch-petrographische Studien in der patagonischen Cordillera. *Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala* 11: 118.
- Riley, T.R.; Burton-Johnson, A.; Flowerdew, M.J.; Poblete, F.; Castillo, P.; Hervé, F.; Leat, P.T.; Millar, I.L.; Bastías, J.; Whitehouse, M.J. 2023. Palaeozoic – Early Mesozoic geological history of the Antarctic Peninsula and correlations with Patagonia: Kinematic reconstructions of the proto-Pacific margin of Gondwana. *Earth-Science Reviews* 236.

La curvatura Patagónica y la evolución de los Andes Fueguinos: Nuevos resultados paleomagnéticos de Isla Navarino

Fernando Poblete¹, Roberto González¹, Matías Peña², Felipe Tapia³⁻⁴, Esteban Salazar⁵, Ricardo Velásquez⁵, Pierrick Roperch⁶⁻⁷, Joaquín Bastías⁸, Paul Duhart⁵, Javier Rodrigo⁹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(3) Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

(4) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(6) Université de Rennes I, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, Rennes, France

(7) CNRS (CNRS/INSU) UMR 6118, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, Rennes, France

(8) Trinity College Dublin, Department of Geology, School of Natural Sciences, College Green, Dublin, Ireland

(9) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

La Curvatura Patagónica es la región ubicada en el extremo sur de Sudamérica, en donde los Andes pasan de tener un rumbo aproximado N-S al norte de los 53° S a un rumbo E-W a los 55° S. Si bien, los mecanismos y la edad de formación de esta estructura tienen implicancias mayores para la evolución tectónica de la región, su origen es aun tema de debate: modelos antagónicos proponen que esta es una estructura heredada o bien, cómo resultado de un plegamiento oroclinal relacionado al cierre de la cuenca de Rocas Verdes y el posterior desarrollo de la faja plegada y corrida de Magallanes (Eagles, 2016; Ghiglione et al., 2007; Poblete et al., 2016; 2014).

En esta contribución presentamos un estudio paleomagnético (paleopolos) de detalle en la Isla Navarino, donde recolectamos 45 sitios (597 especímenes) repartidos a lo largo de su costa norte, en el sector de Dientes de Navarino y en el sector de Cerro Tortuga, extremo suroccidental de la Isla. Los sitios se perforaron en intrusivos granodioríticos y tonalíticos pertenecientes a la serie de intrusivos de las suites Castores (~85 Ma) y Samantha (~65 Ma), en la suite Sills Microdioríticos de Dientes de Navarino (~100 Ma) (Velásquez et al., 2023), pillow lavas, lavas basálticas y gabros de la pseudo ofiolita Tortuga (~140-120 Ma) y en rocas sedimentarias marinas pertenecientes a la Formación Yahgan (~130 Ma). Los análisis fueron realizados en los laboratorios de paleomagnetismo de Geosciences, de la Universidad de Rennes 1 y del Departamento de Geología de la Universidad de Chile usando un magnetómetro de rotación Molspin (Universidad de Chile) y un magnetómetro de rotación JR6 o criogénico 2G (Rennes).

Uno de los resultados principales de este estudio es la observación casi sistemática de la misma dirección magnética en varias localidades estudiadas y en diferentes tipos de rocas (diques y sills dioríticos del sector de los Dientes de Navarino y rocas atribuidas a la pseudo ofiolita de Tortuga). Las características magnéticas y un test de plegamiento negativo muestran que existe una remagnetización (Poblete et al., 2016). Asumiendo una edad de remagnetización de 100 Ma asociada al evento tectonomagmático del Cretácico Medio documentado en la región, la desviación de 120° en sentido antihorario determinada en este trabajo, y de forma sistemática a escala local y regional, sugieren una rotación tectónica global de la isla y un basculamiento de las capas. Por otro lado, las direcciones magnéticas características obtenidas en intrusivos de 65 Ma (Velásquez et al., 2023), y que cortan las secuencias sedimentarias que afloran en los Dientes de Navarino, presentan polaridades inversas sugiriendo un origen primario para la magnetización. En este caso, la rotación obtenida es de 80° en sentido antihorario. Finalmente, las direcciones obtenidas en intrusivos de 85 Ma (Velásquez et al., 2023) en el sector de Estancia Santa Rosa (norte de la Isla) muestran 30 grados de rotación antihoraria.

Las direcciones características obtenidas en este estudio parecen confirmar el control temporal y geográfico en el patrón de rotaciones fueguinas (Poblete et al., 2016; Rapalini et al., 2016). Sin embargo, las rotaciones de 80°, obtenidas en los intrusivos de edad Paleoceno inferior presentados en este estudio, abren la posibilidad que parte importante de estas rotaciones habría ocurrido post 65 Ma, posiblemente asociadas a la exhumación de cordillera Darwin y el desarrollo de la faja plegada y corrida de Magallanes.

Palabras Clave: Paleomagnetismo, Navarino, Rotaciones, Meso-Cenozoico, Arco de Scotia.

Financiamiento: Esta investigación ha sido financiada por fondos de la Universidad de O'Higgins y la Universidad de Chile otorgados a F.P a través del proyecto "Evolución Tectónica y Paleogeográfica de Isla Navarino", y el plan nacional de Geología del SERNAGEOMIN a través del proyecto "IR Geología Básica y Aplicada de la parte Occidental de Isla Navarino".

Agradecimientos: Agradecemos de forma especial a Cecilia por su calidez y apoyo brindado durante las campañas de terreno y la Armada por el importante apoyo logístico durante la campaña a Bahía Douglas, Isla Navarino.

Referencias:

- Eagles, G. (2016). Plate kinematics of the Rocas Verdes Basin and Patagonian orocline. *Gondwana Research*, 37, 98-109.
- Ghiglione, M. C., & Cristallini, E. O. (2007). Have the southernmost Andes been curved since Late Cretaceous time? An analog test for the Patagonian Orocline. *Geology*, 35(1), 13-16.
- Poblete, F., Roperch, P., Hervé, F., Diraison, M., Espinoza, M., & Arriagada, C. (2014). The curved Magallanes fold and thrust belt: Tectonic insights from a paleomagnetic and anisotropy of magnetic susceptibility study. *Tectonics*, 33(12), 2526-2551.
- Poblete, F., Roperch, P., Arriagada, C., Ruffet, G., de Arellano, C. R., Hervé, F., & Poujol, M. (2016). Late Cretaceous-early Eocene counterclockwise rotation of the Fuegian Andes and evolution of the Patagonia-Antarctic Peninsula system. *Tectonophysics*, 668, 15-34.
- Rapalini, A. E., Peroni, J., Luppo, T., Tassone, A., Elena Cerredo, M., Esteban, F., ... & Franciscovilas, J. (2016). Palaeomagnetism of Mesozoic magmatic bodies of the Fuegian Cordillera: implications for the formation of the Patagonian Orocline. *Geological Society, London, Special Publications*, 425(1), 65-80.
- Velásquez, R., Bastías, J., Salazar, E., Poblete, F., González-Guillot, M., Chew, D., Peña, M., Tapa, F., & Drakou, F. (2023). Magmatic arc evolution during the tectonic closure of the Rocas Verdes basin: insights from Cretaceous-earliest Paleocene intrusive rocks of Navarino Island (55°S), Fuegian Andes. *Journal of the Geological Society*. <https://doi.org/10.1144/jgs2022-163>.

Estratigrafía y Geocronología de la Formación Yahgán en la isla Navarino, Chile

Esteban Fidel Salazar Perez¹, Paul Duhart Oyarzo¹, Alfonso Rubilar², Matías Peña³, Fernando Poblete⁴, Felipe Tapia⁵, Ricardo Velásquez⁶

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina Técnica Puerto Varas, Av. La Paz 406, Puerto Varas, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Paleontología y Biocronología, Til Til 1993, Nuñoa, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(5) Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Ciencias Exactas y Naturales, Ciudad Universitaria Pabellón II - Intendente Güiraldes 2160, Buenos Aires

(6) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Geología Regional, Av. Santa María 104, Providencia, Santiago, Chile

La evolución tectonoestratigráfica de los Andes Fueguinos está regida, en gran parte, por el desarrollo de la cuenca de trasarco de Rocas Verdes durante el Cretácico Temprano, su inversión tectónica a partir del Albiano, y la subsecuente obducción del piso oceánico de la cuenca y desarrollo de la faja plegada y corrida de Magallanes a partir del Cretácico Tardío. El relleno sedimentario de la cuenca de Rocas Verdes comprende una serie de unidades litoestratigráficas a lo largo del eje cordillerano, siendo la más austral y con mayor exposición la Formación Yahgan, definida en la isla Navarino por Kranck (1932). La información geocronológica publicada para la Formación Yahgan incluye material paleontológico fosilífero de edad Hauteriviana (Suárez et al., 1985) y Albiana (Olivero y Martinioni, 1996) y dataciones U-Pb en circones detríticos con edades máximas de sedimentación Albiana (Barbeau et al., 2009) y Valanginiana (Calderón et al., 2013). Este amplio rango de edades (más de 30 Ma) incluye las etapas de apertura y de cierre de la cuenca de Rocas Verdes, pero a la fecha no se ha documentado una subdivisión estratigráfica dentro de la Formación Yahgan que pueda dar cuenta de este cambio paleogeográfico regional, como sí se ha reconocido en unidades equivalentes a lo largo de los Andes Fueguinos (Gallardo et al., 2019 y referencias allí señaladas). Si bien Suárez et al. (1985) propone una subdivisión en "pseudo miembros" Wulaia y Bahía Douglas definidos en la isla Navarino, la falta de datos geocronológicos, la intensa deformación y la falta de relaciones estratigráficas en las localidades tipo correspondientes ha dificultado el uso de esa nomenclatura. En este trabajo se presenta la primera edad U-Pb en circón a partir de una toba de la Formación Yagán (131,4±1,3 Ma) además de una edad en circones detríticos (c.a. 105 Ma edad máxima de sedimentación) y dos localidades fosilíferas nuevas en la isla Navarino. Sustentándose en esta información y en levantamientos estratigráficos regionales se proponen dos nuevos miembros dentro de la Formación Yahgan: Miembro Laguna Hermosa (Berriasiano-Hauteriviano) y Miembro Onashaga (Albiano), cada uno de los cuales incluye dos facies mapeables y reconocibles litológicamente en el campo, una fina de areniscas y fangolitas en capas decimétricas y otra gruesa y volcanoclásticas que incluye además capas métricas de tobas, conglomerados y areniscas gruesas.

Palabras Clave: Yahgan Estratigrafía Patagonia Cretácico Navarino.

Financiamiento: Esta investigación ha sido financiada por fondos de la Universidad de O'Higgins y la Universidad de Chile otorgados a F.P a través del proyecto "Evolución Tectónica y Paleogeográfica de Isla Navarino", y el plan nacional de Geología del SERNAGEOMIN a través del proyecto "IR Geología Básica y Aplicada de la parte Occidental de Isla Navarino".

Agradecimientos: Agradecemos a Cecilia del camping El Padrino por su calidez y apoyo brindado durante las campañas de terreno, así como a la Armada de Chile por el apoyo logístico durante la campaña a Bahía Douglas.

Referencias:

- Barbeau, D.; Gombosi, D.; Zahid, K.; Bizimis, M.; Swanson-Hysell, N.; Valencia, V.; Gehrels, G. 2009. U-Pb zircon constraints on the age and provenance of the Rocas Verdes basin fill, Tierra del Fuego, Argentina. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (12): 1-11.
- Calderón, M.; Prades, C.F.; Hervé, F.; Avendaño, V.; Fanning, M.C.; Massone, H-J.; Theye, T.; Simonetti, A. 2013. Petrological vestiges of the Late Jurassic-Early Cretaceous transition from rift to back-arc basin in southernmost Chile: New age and geochemical data from the Capitán Aracena, Calos II and Tortuga ophiolitic complex. *Geochemical Journal* 47: 201-2017.
- Kranck, H.E. 1932. The Coast Cordillera South of Tierra del Fuego. *Acta Geographica* 4 (2): 115- 137.
- Olivero, E.; Martinioni, D. 1996. Late Albian ionoceramid bivalves from the Andes of Tierra del Fuego: age implications for the closure of the Cretaceous marginal basin. *Journal of Paleontology* 70 (2): 272-274.
- Suárez, M.; Hervé, M.; Puig, A. 1985. Hoja Isla Hoste e Islas Adyacentes. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 65: 113 p., 1 mapa a escala 1:250.000.

U/Pb Zircón Dating of Magmatism in the Western Collahuasi District, between 21° and 22° S, Tarapacá Region, Northern Chile: Preliminary Results

María Cecilia Izquierdo¹, Katja Deckart², Marcia Muñoz Gómez³, Brian Townley⁴, Alejandro Sanhueza⁵

(1) Universidad Arturo Prat, Carrera Ingeniería Civil de Minas, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Avda. Arturo Prat 2120, Iquique, Chile.

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(3) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, República 252, Santiago, Chile.

(4) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile.

(5) Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Baquedano 902, Iquique, Chile.

In the Collahuasi district, in its western area, where it borders the Domeyko Fault System, there is scarce geochronological information to clarify relevant aspects of the tectonomagmatic and metallogenic evolution of this area, located between 20° and 21° south latitude. In this work we present the results of a U/Pb geochronological study that seeks to complement and provide missing information for the evaluation of extending the district to the west.

The exposed rocks in the area are varied and correspond, in decreasing order of proportion, to: (i) sedimentary rocks, (ii) intrusive and subvolcanic igneous rocks, (iii) volcanic rocks, and (iv) metamorphic rocks. The sedimentary rocks belong to the Quehuira Formation, a sequence of stratified rocks of continental and marine origin. The intrusive and subvolcanic igneous bodies exhibit a wide compositional range from granodiorites to diorites. The volcanic rocks correspond to andesites and are grouped in the Cerro Empexa Formation (Upper Cretaceous), and to a lesser extent, in the Icanche Formation (middle Eocene). Additionally, andesites from the Collahuasi Formation (upper Carboniferous - Middle Triassic) were recognized. Lastly, the metamorphic rocks are represented by the Chojas Formation (Proterozoic-Silurian), which are outcropping in the crystalline basement block of Sierra Moreno, composed of schists and migmatites.

In this study, a detailed geological survey was conducted for subsequent petrographic analysis, which characterized all the magmatic bodies. Subsequently, a total of 11 samples from different igneous bodies were selected for a U/Pb geochronological study in zircon grains analyzed at Macquarie University, Australia. Six intrusive and four subvolcanic samples were dated, yielding ages from the upper Eocene (Bartonian) - Upper Cretaceous (Maastrichtian). In addition, 1 sample of volcanic rock with pyrite/chalcopryrite mineralization yielded a middle Permian (Roadian) age, which also contains indications from zircons of basement material of lower Paleozoic - Proterozoic age.

The study area is physiographically divided into three blocks from north to south: north, center, and south, limited by the Huatacondo creek to the north, Paguana in the center, and Choja to the south, which produce elevation differences between the mentioned blocks. The ages of the northern block indicate a normal west-to-east migration of the magmatic arc, while in the central block, several igneous bodies of Upper Cretaceous/lower-middle Eocene age were obtained in this study, which show an abnormal magmatic migration compared to the previous one. As for the southern block, the normal migration of the magmatic arc is repeated.

This work presents preliminary data regarding the magmatic ages in the study area, which will be a significant geological contribution to the western sector of the Collahuasi district and a complement to the north-south metallogenic belts of Chile.

Keywords: U/Pb geochronology, igneous bodies, Collahuasi district, Domeyko Fault System.

Financing: This work has been funded by Company Minera Doña Inés de Collahuasi.

Caracterización de la Suite Alcalina Passo da Capela (Brasil) y su contexto geodinámico

Karina Luengo¹, Carla C. Porcher², Márcia Boscato Gomes², Tiago Saldanha¹, Mauricio Dias da Silva¹, Diego Jaldín³⁻⁴

(1) Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brazil

(2) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brazil

(3) Grupo de Tectónica, Mendoza, Argentina

(4) Programa de Doctorado en Ciencias mención Geología, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La Provincia de Piratini incluye todas las rocas alcalinas conocidas en el Escudo Sul-Rio-Grandece, formado por 34 cuerpos agrupados en la Suite Passo da Capela. Las ocurrencias son principalmente cuerpos fonolíticos localizados en la parte interna y a lo largo de los bordes de una depresión tectónica de tendencia NE-SW del Graben de Arroio Moirão. El conjunto fonolítico se presenta como *plugs*, diques y *pipes*. Según las edades K-Ar las rocas oscilan entre 99 - 76 Ma con una edad media en roca total y feldespato de $84,6 \pm 6,7$ Ma. Los datos de las trazas de fisión en apatitas indican edades de 97,7 a 133 Ma. Las rocas son principalmente fonolitas tefríticas y fonolitas subordinadas, metaluminosas como peralcalinas, según el índice alcalino. Los conjuntos minerales incluyen feldespato alcalino, feldespatoideos y clinopiroxeno, y como fases accesorias granate, apatita, Ti-magnetita y titanita. Las fonolitas son una de las rocas feldespáticas y tienen una textura porfídica o subafírica/afírica. Los tipos porfíricos presentan fenocristales de feldespato alcalino, clinopiroxeno, nefelina, noseana y melanita, y microfenocristales de magnetita, apatita y titanita engastados en una masa base hipocristalina-hipohialina. Las variedades afíricas pueden contener escasos fenocristales y microfenocristales de sanidina, nefelina, noseana, clinopiroxeno, granate y titanita. La razón inicial media $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para toda la Suite Piratini es de $0,70533 \pm 0,00031$ (Barbieri *et al.*, 1987; Viero, 1998 en Philipp *et al.*, 2005); las razones iniciales $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ para son de 0,51225 y 0,51230 (Philipp *et al.*, 2005). Estos valores están en el mismo rango de otros complejos alcalinos brasileños, e incluso de los basaltos toleíticos de alto Ti espacialmente asociados de la cuenca sur de Paraná. Sin embargo, se han encontrado circones heredados de la roca de caja (2 Ga y 600 Ma) en estas fonolitas. Estos antecedentes en conjunto, representan discrepancias sobre el origen de la suite y los procesos que la afectaron. Es importante el estudio de las rocas alcalinas debido a su potencial económico, teniendo alta concentración de P y Nb.

Palabras Clave: Magmatismo alcalino, Fonolitas, Feldespatoideos.

Referencias:

- Barbieri, M., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Loss, E., Macciota, G., Morbidelli, L., Scheibe, L.F., Tamura, R.M. & Traversa, G. (1987). Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. 1. The phonolite suite from Piratini, RS. *Geochimica Brasiliensis* 1, 109-138.
- Philipp, R. P., Viero, A. P., COMIN CHIARAMONTI, P., & Gomes, C. B. (2005). Mesozoic alkaline rocks of Rio Grande do Sul. In *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform* (pp. 573-590). Edusp.
- Viero, A.P. (1998). *O magmatismo máfico alcalino Mesozóico do Rio Grande do Sul*. Ph.D. Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, 249p.

Edad de depositación y análisis de proveniencia de los detritos de la Formación Santa Juana, Región del Bío-bío, Chile

German Romero¹, Pablo Rossel¹

(1) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Geología, Autopista Talcahuano 7100, Concepción, Chile

La Formación Santa Juana (36°58' a 37°14' S), la cual fue depositada en la Cuenca Bío-bío – Temuco durante el Triásico Superior, se describe como, depósitos marino- continentales, caracterizada por secuencias de conglomerados, areniscas, arcosas, lutitas y fangolitas con alto contenido en fósiles de plantas. Estas rocas presentan una relación de contacto en incorformidad con el basamento cristalino Paleozoico. Según trabajos anteriores estas rocas se depositaron en un ambiente fluvio-aluvial sobreimpuesta por un sistema de ríos trenzados, con lagos y abanicos aluviales. Mediante el uso dataciones U-Pb en circones detríticos y un análisis petrográfico, se logró establecer una edad de depositación máxima para la Formación Santa Juana. Además, de caracterizar los detritos presentes en la formación y determinar su origen. Este análisis involucro el estudio de las características mineralógicas y texturales de las rocas, así como la relación con las litologías circundantes. Para el estudio, se extrajeron 6 muestras de la Formación Santa Juana, en donde se realizaron cortes pulidos transparentes con el objetivo de llevar a cabo un conteo modal de areniscas de grano medio a grueso, adicionalmente se facilitaron datos de circones detríticos correspondientes a 2 muestras extraídas de la zona norte y sur de la formación. Los resultados obtenidos del análisis de circones detríticos muestran 2 edades, las cuales fueron 214 ± 0.59 Ma (edad de depositación máxima) para el sector sur de la formación y 327 ± 0.66 Ma (edad de depósito) en el sector norte de la misma. Por otro lado, la distribución acumulativa de los circones demostró un patrón de ambientes tectónicos convergentes a extensionales. En cambio, el análisis petrológico arrojó petrofacies desde arcosas, arcosas líticas y litoarenitas feldespáticas, además de mostrar ambientes de depositación desde continental transicional a orógenos reciclados. En conclusión, se muestra hacia el sur de la cuenca un patrón, en donde los detritos no han sufrido proceso de reciclaje, lo cual se estima una incorporación de sedimentos de fuentes cercanas y elevadas, teniendo una proveniencia restringida. Por otro lado, la zona norte muestra un patrón distinto, describiendo características de una alta tasa de sedimentación, seguidos de periodos de calma cortos. Esta configuración refleja características de una cuenca extensional, lo cual presenta edades de circones detríticos que son mucho más antiguas que el tiempo de acumulación de sedimentos.

Palabras Clave: Geocronología, Python, Conteo-Modal, Petrología, Formación Santa Juana.

Financiamiento: Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Geología, Autopista Talcahuano, 7100, Concepción.

Referencias:

- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile-an outline.
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J. y Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*.
- Charrier, R., Ramos, V., Tapia, F., y Sagripanti, L. (2014, 03). Tectono-stratigraphic evolution of the andean orogen between 31 and 37 s (chile and western argentina). En (Vol. 399). <https://doi.org/10.1144/SP399.20>
- Dickinson, W. R., & Gehrels, G. E. (2009). Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2), 115-125.
- Ferraris, F. (1981). Mapas geológicos preliminares de Chile. hoja los Ángeles-Angol, escala 2 1:250.000 (Inf. Téc.). Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Leppe, M., Moisan, P., Abad, E., & Palma-Heldt, S. (2006). Paleobotánica del Triásico Superior del valle del río Biobío, Chile: Clase Filicopsida. *Revista geológica de Chile*, 33(1), 81-107.
- Mardonez, D., Velásquez, R., Merino, R., & Bonilla, R. (2012). Caracterización y condiciones de metamorfismo de una nueva unidad dentro del paleozoico de la Cordillera de la Costa (Unidad Patagual–El Venado), Región de Biobío, Chile. In XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (pp. 365-367).
- Nielsen, S. (2005). The triassic santa juana formation at the lower biobío river, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 19 (4), 547-562. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.06.002>.
- Tavera, J. (1960). El Triásico del valle inferior del río Biobío. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Instituto de Geología, Publicación, 18, 317-345

Descifrando la construcción inicial del Batolito San Francisco-Stock Yerba Loca (Chile central, 33°S): geoquímica y geocronología de las facies máficas marginales

Sebastián Santibáñez Flores¹, Katja Deckart¹, Ítalo Payacán², Lorenzo Tavazzani³

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias, Física y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(3) Instituto de Petrología y Geoquímica, ETH Zürich, Zürich, Suiza

Comprender la evolución y arquitectura de los sistemas de arco magmático ha llevado a realizar múltiples estudios acerca de la formación de los cuerpos plutónicos emplazados en los niveles superiores de la corteza, debido a que son claves para la comprensión de la diversificación composicional y el transporte de calor a través de la corteza. Sin embargo, la reconstrucción de la historia evolutiva de sistemas magmáticos de arco continental muchas veces se ve obstaculizada por el escaso registro de los pulsos iniciales del magma primitivo que permitió dar lugar a los magmas diferenciados de las etapas tardías. Dicha dificultad muchas veces se debe a la intensa actividad magmática prolongada durante grandes períodos en zonas estrechas de la corteza, al reciclaje de las rocas formadas por los pulsos tempranos. En este sentido, los procesos y escalas de tiempo de la construcción de grandes sistemas magmáticos emplazados en la corteza superior han sido objeto de intenso debate.

El magmatismo Mioceno registrado en los Andes de Chile central (33°-34°S), representa un segmento de arco magmático, representado por numerosos plutones y stocks emplazados en rocas volcánicas de las Formaciones Abanico y Farellones. En particular, el Batolito San Francisco ha sido descrito como un complejo plutónico de composición variable (desde cuarzomonzonita hasta pórfidos riolíticos), construido mediante la amalgamación de pulsos de magma entre 15-4 Ma. al cual se asocia la construcción del pórfido cuprífero Río Blanco-Los Bronces. Se ha propuesto que el Batolito San Francisco representa el remanente de un sistema magmático transcortical que habría permitido alimentar el magmatismo prolongado y procesos de mineralización por al menos 10 Ma. En el extremo sureste del batolito, se encuentra el stock Yerba Loca: un intrusivo de unos 25 km² constituido por unidades que varían desde gabros hasta cuarzo monzodioritas, con edades registradas de 14.9 Ma (U-Pb en circón). En esta contribución, se presentan nuevos antecedentes geoquímicos y dataciones U-Pb en circón obtenidos de las facies magmáticas que conforman al stock Yerba Loca.

Los resultados muestran que el stock Yerba Loca está constituido por tres unidades magmáticas: (1) gabros de ortopiroxeno y olivino subordinado, las cuales destacan como parte de las rocas más básicas del plutonismo Mioceno de Chile central; (2) cuarzodioritas, las cuales intruyen a las rocas máficas ubicadas en el margen; y (3) monzodioritas a cuarzomonzodioritas, las cuales son las últimas en intruir. Dataciones de U-Pb en circón (LA-ICP-MS) en muestra provenientes de las distintas unidades del stock muestran edades similares a las ya reportadas del Mioceno medio, registradas en cuarzodioritas y cuarzo monzodioritas. Al integrar las edades publicadas previamente para el stock Yerba Loca y el Batolito San Francisco, se logra apreciar un crecimiento en las edades de cristalización de circón desde el norte (BSF) hacia el sur.

Por otro lado, los gabros presentan dos poblaciones de circones, la primera con edades de cristalización del Oligoceno superior – Mioceno inferior (cercana a las edades registradas en las rocas volcánicas circundantes), y la segunda (circones heredados) con edades del Oligoceno inferior, siendo estas representativas del 24% de circones obtenidos en estas rocas. Esto indica que los gabros, ubicados en el margen del stock Yerba Loca, representan un sistema plutónico más antiguo que las unidades más diferenciadas y no formó parte del sistema magmático Batolito San Francisco-Yerba Loca. Nosotros interpretamos que los gabros representan un conducto magmático discreto que alimentó parte de los sistemas volcánicos del inicio del Mioceno en el sector.

A partir de los antecedentes aquí presentados, se desprende que el Stock Yerba Loca registra los pulsos magmáticos tempranos durante la construcción inicial del Batolito San Francisco, construido mediante inyecciones iniciales de magma cuarzodiorítico (La Parva) y seguido por inyecciones de magma monzodiorítico a cuarzo monzodiorítico en etapas más tardías (Villa Paulina). Estos diversos estadios podrían haber tenido cabida en un reservorio magmático homogéneo, donde la diferenciación tendría lugar a nivel de emplazamiento, o bien, podría asociarse al ensamble de varios pulsos magmáticos diferenciados en un reservorio ubicado a mayor profundidad que la del nivel de emplazamiento. Esto sugiere que la construcción del sistema San Francisco-Yerba Loca fue alimentado desde el extremo norte del batolito, sustentando la idea de que bajo el pórfido cuprífero Río Blanco-Los Bronces se desarrolló un sistema transcortical que permitió sustentar termalmente el sistema que alberga el magmatismo-mineralización desarrollada durante dicho período.

Palabras Clave: Magmatismo, Geocronología, Geoquímica de magmas, Magmatismo Cenoicoico.

Financiamiento: Salidas a terreno, análisis geoquímicos y realización de cortes transparentes, financiado por el proyecto FONDO DE DESARROLLO A LA PUBLICACIÓN PEP I-2022003 Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Mayor, a cargo del Dr. Ítalo Payacán. Análisis isotópicos y geocronológicos realizados en colaboración con el Dr. Lorenzo Tavazzani del laboratorio de espectrometría de masa, del Instituto de Geoquímica y Petrología del ETH Zürich (Suiza).

Agradecimientos: Agradece al proyecto PEP I-2022003, a cargo del Dr. Ítalo Payacán (Universidad Mayor). Y a la colaboración con el Dr. Lorenzo Tavazzani del Instituto de Geoquímica y Petrología del ETH Zürich (Zürich).

Reseteo termal en plagioclasa revelado por geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: Registro en lavas dacíticas de Isla Low, Islas Shetland del Sur, Antártica

Paula Soledad Silva Cruces¹, Joaquín Bastías¹⁻²

(1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Avenida Ejército Libertador 146, Santiago, Chile

(2) College Green, Department of Geology, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland

Este trabajo se enfoca en dos muestras de las sucesiones volcánicas del Miembro Albatross Hill (Cretácico Inferior) descritas anteriormente como lavas andesíticas (Smellie, 1979; Bastías et al. 2019). Bastías et al. (2019) reporta la edad de la masa fundamental de esta unidad en ca. 140-137 Ma, compuesta de microcristales de cuarzo, plagioclasas alteradas a arcilla, feldespato potásico, minerales opacos poligonales y vidrio diseminado. Aquí presentamos estudios petrográficos, geoquímica de roca total y resultados geocronológicos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa, los cuales se recolectaron en la misma roca utilizada en Bastías et al. (2019). Éstos últimos muestran una diferencia considerable entre los resultados obtenidos en masa fundamental y los concentrados de plagioclasa. Mientras los resultados en masa fundamental de la muestra 15JB59 tiene una edad plateau $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $137,5 \pm 0,7$ Ma y la muestra 15JB60 de $139,7 \pm 0,3$ Ma (Bastías et al., 2019), las plagioclasas tienen en estas muestras edades plateau $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $110,2 \pm 2,0$ Ma y $111,3 \pm 1,3$ Ma, respectivamente. Estos resultados constatan una diferencia de ~28 Ma entre la masa fundamental y la plagioclasa en el sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Frente a estos resultados se sugiere su asociación a un reseteo termal afectando solamente la plagioclasa, pero no la masa fundamental que ocurrió hacia los ca. 110 Ma. Si bien la presencia de minerales de alteración ha sido descrita en el archipiélago de las Islas Shetland del Sur (Smellie, 1979; Smellie et al., 1984; Machado et al., 2005; Hervé et al., 2006; Hasse et al., 2012; Bastías et al., 2016), esta es la primera cuantificación de su impacto a través de geocronología. La edad presente en las plagioclasas se asocia a los minerales presentes en las alteraciones que corresponden a sericita, circón, clorita y arcillas. Posiblemente estas alteraciones fueron formadas por eventos a escala regional como procesos que ocurrieron en el Cretácico Inferior, probablemente asociados a la migración hacia el oeste de América del Sur inducida por la apertura del Atlántico Sur (Mpodozis y Ramos, 1989). Bastías et al. (2023) sugirieron que los primeros depósitos de volcanismo subaéreo en las Islas Shetland del Sur pueden registrar el desarrollo temprano del ciclo andino en las latitudes de la Península Antártica. La geoquímica y petrografía del Miembro Albatross Hill sugiere que estas rocas previamente descritas como lavas andesíticas, corresponden a lavas dacíticas formadas en un arco.

Palabras Clave: reseteo termal, Islas Shetland del Sur, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Antártica, geocronología.

Financiamiento: Este trabajo se financió por el proyecto INACH RT-06-14 y la Universidad de Ginebra.

Referencias:

- Bastías, J., Calderón, M., Israel, L., Herve, F., Spikings, R., Pankhurst, R., Castillo, P., Fanning, M., Ugalde, R. 2019. The Byers Basin: Jurassic-Cretaceous tectonic and depositional evolution of the forearc deposits of the South Shetland Islands and its implications for the northern Antarctic Peninsula. *International Geology Review* 62:11, p.1467-1484. DOI: [10.1080/00206814.2019.1655669](https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1655669).
- Bastías, J., Chew, D., Villanueva, C., Riley, T., Manfroi, J., Trevisan, C., ... & Jaña, R. A. 2023. The South Shetland Islands, Antarctica: Lithostratigraphy and geological map. *Frontiers in Earth Science* 10, 2581.
- Haase, K.M.; Beier, C.; Fretzdorff, S.; Smellie, J.L.; Garbe-Schönberg, D. 2012. Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163 (6): 1103-1119.
- Hervé, F.; Faúndez, V.; Brix, M.; Fanning, M. 2006. Jurassic sedimentation of the Miers Bluff Formation, Livingston Island, Antarctica: evidence from SHRIMP U-Pb ages of detrital and plutonic zircons. *Antarctic Science* 18 (2): 229-238.
- Machado, A.; Lima, E.F.; Chemale, F.; Morata, D.; Oteiza, O.; Almeida, D.P.M.; Figueiredo, A.M.G.; Alexandre, F.M.; Urrutia, J.L. 2005. Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences* 18 (3-4): 407-425.
- Smellie, J.L. 1979. The geology of Low Island, South Shetland Islands, and Austin rocks. (49): 239-257.
- Smellie, J. L., Pankhurst, R., Thomson, M. R. A., & Davies, R. E. S. (1984). The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry, and evolution (Vol. 87). British Antarctic Survey.

Estimating the pre-eruptive conditions of the magmatic system beneath the El Negrillar monogenetic field (Central Andes, Chile)

Deborah Cáceres Baez¹, Patricia Larrea Marquez¹⁻², Teresa Ubide Garralda³, Jo Roberts³, Camila Loaiza Contreras¹

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Universidad de Chile

(3) School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, Australia

El Negrillar (EN) monogenetic field (24°18' S, 68°25' W) is located in the Central Volcanic Zone (CVZ) of the Andes, to the SW of the Altiplano Puna Volcanic Complex. EN is composed of three clusters: Northern (NEN), Central (CEN), and Southern El Negrillar (SEN), and corresponds to the most voluminous and extensive monogenetic volcanic field identified in the CVZ [1], with 51 eruptive centers and 98 associated eruptive phases, emplaced in the last 1 Ma [2].

Petrographically, the lava flows of EN are poorly crystalline (average 12.3 vol. %), presenting a microporphyric texture in a hypocrySTALLINE to holocrystalline groundmass. The mineral phases (olivine, plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene and amphibole) are generally isolated and occasionally forming cumulus and glomerocrysts, and it is also common to find disequilibrium textures such as sieve, zonation, resorption, reaction rims, and opacitic rims. Moreover, EN shows a compositional variation from south to north: SEN is characterized by the most primitive lavas (56.17 – 64.62 wt. % SiO₂) rich in olivine, clinopyroxene and plagioclase, while the most differentiated compositions (57.17– 64.62 wt. % SiO₂) are found in NEN, being rich in amphibole, orthopyroxene, clinopyroxene, and plagioclase; on the other hand, CEN shows an intermediate behavior between the previous two (53.22 – 65.43 wt. % SiO₂), with compositional and mineral abundance variations depending on the observed eruptive center.

This work covers the first study of the mineral chemistry of the EN effusive products. The selected samples comprise the total compositional variation of the volcanic field, through electron microprobe analysis of the mineral phases present, following a core to rim compositional profile. The chemical equilibrium relationships of the analyzed crystals with the melts that host them were evaluated through Rhodes equilibrium diagrams [3], which use the Fe – Mg partition coefficient between the crystal and the melt for olivine, clinopyroxene, orthopyroxene and amphibole, and the An - Ab partition coefficient between the plagioclase and the melts for the feldspars. Subsequently, the Ol – liquid [4], Cpx – liquid [4, 5], Opx – liquid [4], Pl – liquid [4] and Amp [6] thermobarometers and hygrometers were applied to the phenocrysts that passed the equilibrium tests, and therefore provide information about the pre-eruptive conditions of the system.

Accordingly, the mineral phases of EN show a slightly polybaric crystallization trend, with mean temperatures clustered at 1,13 ± 29 °C for olivine, 1,101 ± 36 °C for plagioclase, 1,041 ± 39 °C for orthopyroxene and 1,033 ± 42 °C for clinopyroxene, pressures at 3.4 ± 2.1 kbar for orthopyroxene and 3.1 ± 1.7 kbar for clinopyroxenes, and with an initial water content of 2.0 ± 1.1 wt. % calculated for the most primitive plagioclase-bearing rock; amphibole phenocrysts are the latest mineral phase crystallizing at 946 ± 22 °C, 2.9 kbar ± 12%, with H₂O contents > 4.2 wt. % and under moderately oxidizing conditions. This suggests that crystallization and magmatic differentiation took place in the upper to middle crust. The determination of these intensive variables (P-T-H₂O) together with the study of the temporality of eruptive centers, will facilitate the generation of a conceptual model, in space and time, of the magmatic plumbing system that feeds this voluminous monogenetic volcanic field.

Keywords: Thermobarometry, Altiplano-Puna Volcanic Complex, Magmatic plumbing system, Negro de Aras.

Financing: Financial support was provided by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) FONDECYT de INICIACIÓN Folio 11200293 granted to P. Larrea, and FONDAP Folio 15090013, 15200001 and ACE2100005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA).

References:

- [1] Parra-Encalada et al. (2022). Physical and chemical evolution of the largest monogenetic lava field in the Central Andes: El Negrillar Volcanic Field, Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- [2] Loaiza et al. (in rev.). 40Ar/39Ar geochronology of El Negrillar Volcanic Field, Chile: Constraints on the temporal evolution of monogenetic volcanism in the Central Andes.
- [3] Rhodes et al. (1979). Magma mixing at mid-ocean ridges: Evidence from basalts drilled near 22° N on the Mid-Atlantic Ridge. *Tectonophysics*.
- [4] Putirka (2008). Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*.
- [5] Putirka et al. (2003). New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist*.
- [6] Ridolfi (2021). Amp-TB2: An Updated Model for Calcic Amphibole Thermobarometry. *Minerals*.

Reconstrucción del evento eruptivo del volcán monogenético "Los Hornitos Este" a partir de la estratigrafía y geoquímica de sus productos efusivos

Rocío Calfin¹⁻², Pablo Salas Reyes¹⁻² Verónica Oliveros¹⁻²

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

El volcanismo monogenético se caracteriza por la formación de volcanes individuales con eventos eruptivos de corta duración con volúmenes eruptivos pequeños (<1 km³). Los volcanes de este tipo pueden corresponder a conos de salpicadura (del inglés *spatter*), conos de escoria, anillos de toba y maares. Los productos eruptivos más comunes son de composición basáltica (Nemeth, 2010).

Los conos de escoria generalmente se forman a través de erupciones monogenéticas y presentan alturas de 150-300 m. Estos se forman mediante erupciones predominantemente estrombolianas, las cuales se caracterizan por tener explosiones intermitentes que expulsan piroclastos a decenas o cientos de metros desde el cono emisor y también presentan flujos de lavas que pueden cubrir decenas de km² (Pioli et al., 2008).

El volcán monogenético Los Hornitos se ubica a 11 kilómetros al suroeste del cráter Quizapú y está compuesto por dos conos piroclásticos, denominados Cono Este y Oeste. Mediante investigaciones previas sobre relaciones estratigráficas y estado de conservación de los conos, se ha determinado que el cono Este es el más joven; y debido a que no presenta rastros de erosión glacial, se le asigna una edad Holoceno (Salas et al., 2016).

Los productos eruptivos están compuestos por depósitos piroclásticos y efusivos. Estos presentan un excelente estado de conservación lo que permite estudiarlos en detalle y así entender las condiciones de emplazamiento. Las características principales de cada uno de estos productos son las siguientes: (1) Los depósitos de tefra se distribuyen hasta 1,5 km alrededor del cono. Están compuestos por lapilli y ceniza, siendo el olivino la fase mineral más común en estos depósitos. (2) Flujos de lavas con proporciones variables de fenocristales de olivino mayoritariamente y en menor medida clinopiroxeno y plagioclasa (Salas et al., 2016).

Estudios previos han sido realizados en detalle únicamente en los depósitos piroclásticos del Cono Este. Estos evidencian la presencia de olivinos primitivos con valores de Ni 1.800- 3.500 ppm y Fo 90- 92,5, además estudios de difusión modelan que el tiempo transcurrido entre la formación de los cristales y su salida a la superficie ocurrió en un lapso de 3,5 a 40 días (Salas et al., 2021). Por otro lado, en cuanto a la etapa efusiva, se han realizado estudios únicamente en muestras aleatorias de lava, que revelan composiciones de olivino con Ni<1.095 ppm y Fo 64-85 (Salas et al., 2021). A partir de los datos de roca total y química mineral se puede establecer que existe un gap composicional entre ambas unidades. Sin embargo, existe un desconocimiento respecto a la temporalidad del emplazamiento de los diferentes flujos de lava, así como de la mineralogía y madurez textural de las diferentes fases minerales presentes. Se plantea la hipótesis de que podría existir un flujo de lava temprano en el evento eruptivo del Cono Este que se asemeje composicionalmente a los depósitos de caída.

A partir del estudio geomorfológico y estratigráfico del campo de lavas del cono Este, se logró diferenciar 3 etapas de emplazamiento: una temprana, intermedia y tardía. Estas varían en espesores y ancho de las coladas como también texturalmente. En base a los estudios de campo, se identifican diferencias texturales y mineralógicas en las muestras de lavas extraídas, esto de acuerdo con su temporalidad de emplazamiento, siendo las lavas más tardías las que presenten mayor desarrollo cristalino y mineral, con presencia de fenocristales olivinos, clinopiroxenos y plagioclasa. Mientras que las coladas de lava temprana presentan mayoritariamente fenocristales de olivino con fenocristales de plagioclasa subordinadas.

Este estudio presenta un aporte a la reconstrucción del evento eruptivo del volcán monogenético Los Hornitos Este, permitiendo engranar temporal y químicamente los productos eruptivos efusivos y piroclásticos; lo cual posibilita la comprensión más acabada de la actividad estromboliana característica del volcanismo monogenético máfico.

Palabras Clave: Volcanismo Monogenético, Olivino, Etapa efusiva, Etapa explosiva, Actividad Estromboliana.

Financiamiento: Financiado por el Instituto Milenio de investigación en Riesgo volcánico- Ckelar Volcanes.

Agradecimientos: Instituto Milenio de investigación en Riesgo volcánico- Ckelar Volcanes. Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción. ENEL- Central Hidroeléctrica Cipreses.

Referencias:

- Nemeth, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism. In What Is a Volcano? GSA Special Paper (Vol. 470, p. 43).
- Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, P., Rosi, M., & Granados, H. D. (2008). Explosive dynamics of violent Strombolian eruptions: the eruption of Parícutin Volcano 1943–1952 (Mexico). *Earth and planetary science letters*, 271(1-4), 359-368.
- Salas, P. A., Rabbia, O. M., Hernández, L. B., & Ruprecht, P. (2017). Mafic monogenetic vents at the Descabezado Grande volcanic field (35.5 S–70.8 W): the northernmost evidence of regional primitive volcanism in the Southern Volcanic Zone of Chile. *International Journal of Earth Sciences*, 106, 1107-1121.
- Salas, P., Ruprecht, P., Hernández, L., & Rabbia, O. (2021). Out-of-sequence skeletal growth causing oscillatory zoning in arc olivines. *Nature Communications*, 12(1), 4069

Geochemistry and petrogenesis of volcanic products from minor eruptive centers from the Rupanco lake area, Andean Southern Volcanic Zone

Alexandre Corgne¹, Benjamín Lobos¹, Nicolás Fuentes¹

(1) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

Volcanic samples were collected from several post-glacial minor eruptive centers (MEC) and associated deposits and lava flows located in the Rupanco Lake area, specifically on the northern bank of the lake, from the Rupanco cones (40°52'S – 72°18'W), and on the southern bank, at the base and from within the Cordón Cenizos chain (40°59'S – 72°19'W / 40°55'S – 72°14'S). The Rupanco cones formed over the inferred trace of the Liquiñe-Ofqui fault zone on the margin of the Antillanca Volcanic Complex. Geomorphological examination indicates the presence of two cones, possibly constructed on top of a third older one. Lava and pyroclastic materials were collected from these cones. Meanwhile, the Cordón Cenizos chain located on the other side of Rupanco Lake has a NE direction and extends on both sides of the Puntagudo stratovolcano along a suspected fissure transverse to the Liquiñe-Ofqui fault zone. Lava samples were collected from two distinct lava flows outcropping near the southern bank and from 4 well-preserved MEC (2 on the western side, 1 on the eastern side and 1 just north of the Puntagudo volcano).

Whole-rock major and trace element contents indicate that the erupted products (lavas and pyroclastics) are basalts and basaltic andesites with transitional calc-alkaline/tholeiitic affinity and trace element patterns typical of arc magmas. Samples from the northern Rupanco MEC can be assigned to three distinct groups based on their Mg#, trace element patterns and petrography. Group A shows the highest Mg# (0.62), the strongest enrichment in the most incompatible elements (La/Yb ~9) and has olivine and clinopyroxene as main phenocrysts. Group C has lower Mg# (0.49), lower incompatible enrichment (La/Yb ~4-5) and plagioclase and olivine as main phenocrysts. Group B has intermediate geochemical characteristics (Mg# 0.53, La/Yb ~6) and plagioclase, olivine and clinopyroxene as main phenocrysts. Samples from Cordón Cenizos MEC also show a range of Mg# from 0.52 to 0.67 and incompatible element enrichment spanning that of groups B and C (La/Yb ~3.4-6.8). Petrogenetic modeling of the magmatic evolution of each group is currently underway. Whole-rock REE patterns of Rupanco MEC can be reproduced considering 12-15% degree of melting of variably enriched mantle sources compared to primitive upper mantle (PUM) values. Group A is linked to a mantle source that is the most enriched, similar to a source made of 20% PUM and 80% subcontinental lithospheric mantle (SCLM). The source of group C is less enriched (35:65 SCLM:PUM) and that of group B has intermediate enrichment (55:45 SCLM:PUM). Meanwhile, whole-rock REE patterns of Cordón Cenizos MEC are better modeled considering 15-20% partial melting of similarly enriched sources (from 30:70 to 65:35 SCLM:PUM). Such a diversity of sources is not expected for minor eruptive centers located in a fairly restricted area. It may reflect polybaric melting of a mantle column with variable degree of enrichment or depletion. Phenocryst disequilibrium textures and mineral composition can help constrain conditions of magma storage and pre-eruptive dynamics. Preliminary results for the Rupanco cones indicate a potential crustal storage in the middle crust at about 10-20 km depths (1100-1200 °C, 4±1.7 kbar). Assuming a temporality of events based on the degree of differentiation (Mg#, %Fo), one can speculate that group A represents an older eruptive phase, followed by the eruption of group B and finally group C. Pyroclastic deposits from the first two phases (A and B) were not observed possibly because they are recovered by group C deposits. The greater development of disequilibrium textures in clinopyroxene and plagioclase from group B and C would indicate additional petrogenetic mechanisms, such as decompression (expected following eruption of group A), perturbation of boundary layers within the magma chamber and possibly hybridization and re-heating following magma recharge. Petrographic and mineral chemistry studies of Cordón Cenizos products are currently underway. Results and corresponding geothermobarometry modeling to constrain pre-eruptive conditions will be presented at the congress and compared with the results obtained for the Rupanco MEC.

Keywords: Monogenetic volcanism, Andean Southern Volcanic Zone, Rupanco, Cordón Cenizos, Petrogenesis.

Geology map and eruptive history of monogenetic cluster La Negrillar (Central Andes, Chile)

Matías Espinoza San Martín¹, Felipe Valdebenito Molina¹, Patricia Larrea¹⁻², Sergio Salinas³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP. 04510, Coyoacán, Ciudad de México

La Negrillar is a monogenetic volcanic cluster situated in the main arc of the Central Andes Volcanic Zone (CVZ) in Chile. Positioned to the west of the debris avalanche deposit from Socompa volcano, this volcanic cluster is part of the larger Altiplano Puna Volcanic Complex (21°-24°S). It spans across the northern segment of the Guanaqueros basin, placed between the Sierras San Juan, Almeida, and Guanaqueros faults.

Previous studies on La Negrillar, described this area as a monogenetic lava field composed of six eruptive centers of basaltic-andesite composition [1]. Subsequently, one sample from the most extensive lava flow from La Negrillar was analyzed for major and trace elements, in a study involving other monogenetic center in the southern sector of the Salar de Atacama [2], and a geochronologic study reported two ages between 1.4±0.5 Ma (K/Ar age in groundmass) and 0.54±0.05 Ma (⁴⁰Ar/³⁹Ar age in groundmass) for two of their lava flows [3].

The aim of this work is revisiting the geological map of La Negrillar eruptive centers. Two scoria cones were mapped, East (LNE) and West (LNW). Both emitted effusive products that cover a total area of 45 km². The lavas are characterized by morphological features such as squeezed-up structures, tumuli, lava boats, compression ridges, *levées*, and lava deltas. Based on the stratigraphy of the lava flows, it has been determined that the LNW volcanic center was the initial one to form in the area. It produced two lava flows with four eruptive phases associated, which had varying lengths ranging from 3.1 to 11.2 kilometers. The thickness of these flows ranged from 15 to 65 meters. Additionally, the LNE center, which followed the establishment of LNW, generated two lava flows with three phases associated. These flows had lengths ranging from 4.9 to 6.8 kilometers and exhibited thicknesses between 20 and 135 meters.

Currently, ongoing efforts are underway to determine the rheological parameters and eruption volumes of each lava flow. This is being achieved through the reconstruction of the paleosurface using contour lines, coupled with the analysis of satellite imagery and the utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for photogrammetry. The volumetric, morphometric, and rheological analysis, together with the detailed study of petrology and geochemistry, will allow to determine the magmatic processes involved in the evolution of this monogenetic cluster's volcanic activity.

Keywords: Scoria cones, rheological parameters, effusive rate, paleosurface reconstruction, photogrammetry.

References:

- [1] Gardeweg, M.; Cornejo, P.; Davidson, J. (1984). Geología del volcán Lullailaco, Altiplano de Antofagasta, Chile (Andes Centrales). Revista Geológica de Chile, Vol. 23, p. 21-37.
- [2] Hoffman, C. (2011). Petrografía y geoquímica de los conos del campo de lavas Negros de Aras (23°57'-24°26' Lat.S y 67°57'-68°42' Lon.O) al norte del volcán Socompa, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra. 114. Pp.
- [3] Solari, M., Venegas, C., Montecino, D., Astudillo, N., Cortés, J., Bahamondes, B., Araya, C., & Espinoza, F. (2017). Geología del área Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 191:88 pp., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the largest monogenetic field in the Central Andes: El Negrillar Volcanic Field, Chile

Camila Loaiza Contreras¹, Patricia Larrea¹⁻², Sergio Salinas³, Daniela Parra-Encalada¹, Rubén Cartagena¹, Benigno Godoy⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, CP. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México

(4) Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Bellavista 7 Recoleta, Santiago, Chile

El Negrillar is a young mafic monogenetic field located in the Central Volcanic Zone (CVZ), within the southern portion of the Andean Altiplano-Puna plateau in Chile (15°S – 28°S). This volcanic field presents the largest extension and magma volume emitted within the monogenetic centers of the Central Andes ($\sim 220 \text{ km}^2$ of extension and $\sim 6.8 \text{ km}^3$ of volume) [1],[2], with mainly effusive and lesser extent explosive activity. It comprises 51 eruptive centers with 98 lava flows, distributed in 3 clusters: Northern El Negrillar (NEN), Central El Negrillar (CEN), and Southern El Negrillar (SEN). The physical, chemical, and petrological evolution of this volcanic field has been previously studied [2],[3], however studies about the identification of phreatomagmatic activity and the determination of the temporal evolution of El Negrillar are still lacking.

This work aims to obtain new and more precise ages of El Negrillar. For this, ten samples of the effusive and explosive activity from El Negrillar have been dated using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, which together with an evaluation of previously published dates (ages ranging between $<1.5 \text{ Ma}$ to $0.6 \pm 0.4 \text{ Ma}$ obtained by K-Ar dating) [4],[5], allowed a new geochronological characterization of the development of El Negrillar monogenetic field. The new plateau ages ($>50\%$ of the ^{39}Ar released with at least three contiguous temperature steps) and mini-plateau ages ($<50\%$ of the ^{39}Ar released with at least three contiguous temperature steps) point to the onset of the volcanic activity at El Negrillar $< 1 \text{ Ma}$, being consistent with the previous ages [4],[5]. These new ages indicate that the effusive activity at El Negrillar probably occurred simultaneously in the three clusters (NEN, CEN and SEN), and the phreatomagmatic activity in the CEN occurred contemporaneously with the effusive activity in the same sector. The end of the volcanic activity within the monogenetic field occurred in the CEN at $\sim 150 \text{ ky}$, which records the youngest ages of El Negrillar. These new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages together with the previous physical, chemical, and petrological studies [3], support the hypothesis of the SEN cluster as part of the El Negrillar monogenetic volcanic field, despite the existence of the Socompa volcano debris avalanche deposit, which occurred at $6.18 (-0.64; +0.28) \text{ ka}$ [6], located between the NEN-CEN and SEN clusters.

Additionally, if these obtained ages are revised within the regional context of the SW sector of the Altiplano - Puna Volcanic Complex, the monogenetic volcanoes seem to present a volcanic migration of mafic vents following a southwest-northeast trend, as represented by their age variation from the oldest to the youngest volcanic center: Morro Punta Negra, La Negrillar, El Negrillar, Tilocalar Sur, Tilocalar Norte, Cerro Tujle, El País, Puntas Negras, La Albóndiga Grande, and Cerro Overo [7],[8],[9],[10],[11],[12]. These results highlight the strong structural control on the emplacement of monogenetic mafic volcanism in the CVZ.

Keywords: Negros de Aras, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, distributed volcanic fields, Altiplano-Puna Plateau, Central Volcanic Zone.

Acknowledgments: Financial support was provided by ANID-FONDECYT de INICIACIÓN #11200293, and FONDAP #15090013, #15200001 and ACE2100005. P. Larrea was also supported by Proyecto de Instalación Académica-FCFM (UCH).

References:

- [1] Loaiza et al. (in rev.). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the El Negrillar Volcanic Field, Chile: constraints on the temporal evolution of monogenetic volcanism in the Central Andes.
- [2] Parra-Encalada et al. (2022). Physical and chemical evolution of the largest monogenetic lava field in the Central Andes: El Negrillar Volcanic Field, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107541.
- [3] Hoffmann (2011). Petrografía y Geoquímica de los Conos del Campo de Lavas negros de Aras al Norte del Volcán Socompa, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción.
- [4] Ramírez (1988). The geology of Socompa volcano and its debris avalanche deposit, northern Chile. Departamento de Ciencias de la Tierra, Open University.
- [5] Ramírez et al. (1991). Mapa geológico del área de los volcanes Socompa y Pular, Región de Antofagasta.
- [6] Grosse et al. (2022). Holocene collapse of Socompa volcano and pre- and post-collapse growth rates constrained by multi-system geochronology. *Bulletin of Volcanology*, 84, 85.
- [7] Gardeweg & Ramírez (1982). III Congreso Geológico Chileno, A111–A123.
- [8] Gardeweg et al. (1993). Mapa Geológico del Área del Salar de Punta Negra y del Volcán Llullaillaco, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Trabajo No. 5: 1.
- [9] Gardeweg et al. (1994). Mapa Geológico del Área de Imilac y Sierra Almeida, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Trabajo No. 7: 1.
- [10] González et al. (2009). Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile. *Tectonics*, 28(6), 1–18.
- [11] Solari et al. (2017). Geología del Área Imilac - Quebrada Guanaqueros, Region de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- [12] van Alderwerelt, B. (2017). Diverse monogenetic volcanism across the main arc of the central Andes, northern Chile. Spring, University of Iowa.

Pequeños centros eruptivos revelando grandes historias magmáticas: análisis isotópicos y petrográficos en la Zona Volcánica Sur de los Andes

Francisca Mallea-Lillo¹, Lucy McGee¹, Eduardo Morgado², Carl Spandler¹, Miguel Ángel Parada³

(1) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide, Australia

(2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

A lo largo de la Zona Volcánica Sur (ZVS) de los Andes existen cientos de centros eruptivos menores (CEM) Holocenos de diversos tamaños, composiciones y configuraciones espaciales. Gran parte de ellos están emplazados sobre la Zona de Falla Liquiñe Ofqui (ZFLO), estructura de gran relevancia para la ZVS, la cual ejerce una influencia en la distribución y composición del volcanismo en este segmento.

Los productos de estos CEM son generalmente de composiciones primitivas (basaltos y andesitas basálticas) con historias corticales efímeras, pero complejas. Un ejemplo es el conjunto de CEM Grupo Fui, dentro del cual se han distinguido dos subgrupos (Fui Norte y Fui Sur) con diferencias en sus firmas químicas y características petrográficas. El subgrupo Fui Norte es más bien independiente y el ascenso de sus materiales volcánicos está relacionado directamente con la ZFLO, mientras que Fui Sur posee similitudes con los productos volcánicos del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco. Al igual que el Grupo Fui, en este proyecto se estudiarán condiciones pre-eruptivas y análisis isotópicos en otros centros eruptivos a lo largo de la ZVS.

De igual forma, durante este trabajo se determinarán las concentraciones de isótopos de Sr, Nd y series de U para CEM, permitiendo cubrir ampliamente las diferentes historias magmáticas de CEM a lo largo de la ZVS. Debido a que no hay fraccionamiento isotópico durante los procesos de fusión-cristalización, el uso de isótopos radiogénicos de Sr-Nd es útil para identificar procesos geológicos de la fuente que origina el fundido. Por otro lado, las series de U permiten estudiar procesos geológicos en una amplia escala de tiempo, desde días hasta miles de años. La combinación de isótopos de Sr y Nd, junto a la información de series de U, es una herramienta útil para describir procesos magmáticos desde etapas profundas de la generación de magma, permitiendo conocer las características de la fuente magmática y procesos de subducción para diferentes volcanes en una misma área.

Existe un potencial en la combinación de escalas de tiempo determinadas con dos metodologías: series de U y *diffusion chronometry*, permitiendo conocer el recorrido de un magma desde su génesis hasta su erupción. Actualmente, no se conoce en detalle el tiempo de almacenamiento de los magmas en la corteza para CEM en la ZVS. Las escalas de tiempo magmáticas permiten determinar el tiempo transcurrido entre el desequilibrio en el reservorio y la actualidad, por lo que son también una herramienta muy útil para evaluar riesgos volcánicos.

La integración de información textural, composicional, pre-eruptiva y escalas de tiempo permitirá la creación de un modelo que explique cómo los procesos magmáticos funcionan para CEM en este segmento del arco volcánico, considerando el amplio escenario desde la génesis del magma en la cuña mantélica, hasta la erupción del material volcánico.

Palabras Clave: Centros eruptivos menores, Escalas de tiempo, Series de U, Sr-Nd, Fuentes magmáticas.

Estudio petrográfico y volumétrico de los productos de la erupción de 1979 del volcán Mirador, campo volcánico distribuido Carrán - Los Venados (Zona Volcánica Sur, Chile)

Débora Morales Soto¹, Patricia Larrea Marquez¹⁻², Sergio Salinas³, Angelo Castruccio¹, Laura Becerril Carretero⁴, Lizette Bertin⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP. 04510, Coyoacán, Ciudad de México

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), Rudecindo Ortega 03850, Temuco, Chile

El campo volcánico Carrán - Los Venados (CVCLV) está ubicado al norte del Complejo Volcánico Puyehue - Cordón Caulle, dentro de la Zona Volcánica Sur (ZVS), comuna de Lago Ranco - Región de Los Ríos, Chile. Se compone de al menos 70 centros eruptivos alineados (N60°-70°E); corresponde al mayor conjunto de centros eruptivos menores de la ZVS [1] y está constituido por conos de escoria y estructuras secundarias como maares además del estratovolcán Los Guindos [2]. El campo volcánico tiene actividad en el Holoceno [2] y ha presentado tres erupciones históricas: maar Riñinahue (1907), maar Carrán (1955) y volcán Mirador (1979), siendo las dos primeras de estilo freatomagmático y la última estromboliana [1,3].

La erupción del volcán Mirador (72°03'31"O 40°21'40"S) ocurrió entre el 14 de abril y el 20 de mayo de 1979, durante la cual se construyó un cono de escoria y se emitieron dos coladas de lava de tipo aa. El primer flujo avanzó 900 m desde el cráter en dirección al SE y S (con un volumen estimado de 0,0036 km³ [3]), y el segundo flujo de alcance menor [3], alcanzó los 162 m y fluyó al NO desde la ladera norte del cono. Durante la erupción también se emitió material piroclástico, distribuyéndose al E del cono [3]. Estudios previos indican que el magma que alimentó esta erupción monogenética tuvo una variación composicional de basáltica a andesítica-basáltica [4], y petrográficamente, tanto lavas como tefras, presentan una textura microporfírica con microfenocristales de plagioclasa, olivino, clinopiroxeno y ocasionalmente ortopiroxeno, inmersos en una masa fundamental de textura traquítica [3].

El objetivo de este trabajo es comprender la evolución de la erupción a partir de la petrografía y calcular los volúmenes de la colada de lava y el cono. Para esto se realizó una campaña de terreno donde se tomaron cinco muestras de ambos flujos emitidos, considerando las variaciones desde la parte proximal a la distal al punto de emisión. Dado que la dispersión de piroclastos fue hacia E del cono, se realizó una excavación en esa dirección donde se identificaron y muestrearon cuatro niveles de tefra sobre un paleosuelo asociados a diferentes pulsos eruptivos. Actualmente se está trabajando en la descripción petrográfica de lavas y tefras mediante microscopía óptica, con el fin de caracterizar en detalle los productos de la erupción.

A su vez, en terreno se analizaron parámetros morfométricos, volumétricos y reológicos de la colada de lava y el cono, para luego realizar un modelo digital de superficie y un ortomosaico obtenido por medio de técnicas fotogramétricas. Además, se elaboró el mapa geomorfológico detallado, en donde se observan distintas morfologías en los flujos de lava, mismas que denotan los cambios de dirección del flujo y evolución de su emplazamiento. Junto a fotografías aéreas históricas del área de estudio (vuelos OEA del año 1961 y Trimetrogon del año 1944), se realizará la reconstrucción del relieve previo a la erupción y con ello, se estimará detalladamente el volumen de material emitido durante la erupción.

Este estudio, permitirá conocer en detalle los procesos involucrados en la génesis y evolución magmática de la erupción del volcán Mirador. De esta manera, los resultados obtenidos serán el punto de partida para entender la dinámica magmática en una zona que se encuentra en la posición n°9 del Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile [5].

Palabras Clave: Volcanismo monogenético, Erupción histórica, Fotogrametría.

Financiamiento: "Evolution of a mafic monogenetic volcanic field within the main arc of the Central Andes (Northern Chile)", Proyecto de Investigación Fondecyt de Iniciación n° 11200293 Fondo de Instalación Académica FCFM (Patricia Larrea).

Referencias:

- [1] Moreno, H. (1977). Geología del Área volcánica Puyehue Carrán en los Andes del Sur de Chile. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile. 181 pp.
- [2] Bertin, L.; Moreno, H.; Becerril, L. (2018). Peligros del Campo Volcánico Carrán-Los Venados, región de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 33: 52 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- [3] Moreno, H. (1980). La erupción del Volcán Mirador en abril-mayo de 1979, lago Ranco-Riñinahue, Andes del Sur, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones N° 28, 1-23 pp.
- [4] Castro Pohorecky, A. P. (2015). Caracterización petrográfica y geoquímica de los productos de la erupción del volcán Mirador (AD 1979), Carrán-Los Venados, Chile. Memoria de título, Universidad de Chile. 129 pp.
- [5] Contreras, M.; Figueroa, M.; Pedrero Delgado, G. (2020). Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile 2019, Servicio Nacional de Geología y Minería. 25 pp.

Fuente del magmatismo del campo volcánico Puyuhuapi: Contribución del manto litosférico subcontinental en la génesis de basaltos enriquecidos en la Zona Volcánica Sur de los Andes

Javier Reyes¹, Camila Salas¹, Noushka Gallardo¹, Luis E. Lara²⁻³, Massimo Chiaradia⁴

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Ingeniería y Tecnología

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias

(3) CKELAR Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico, Chile

(4) University of Geneva, Section of Earth and Environmental Sciences

El campo volcánico Puyuhuapi (CVP) es un grupo de nueve centros eruptivos menores localizados sobre la traza principal del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, en la Zona Volcánica Sur (ZVS), formada a su vez por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana entre los 33°S y 46°S (e.g., Stern, 2004, González-Ferrán et al., 1996).

El CVP se compone de basaltos alcalinos relativamente primitivos, con un notable enriquecimiento en elementos incompatibles que lo clasifican dentro de las composiciones de la ZVS denominadas por estudios anteriores como “Kangechi” o “Basaltos tipo 2”, caracterizadas por altas razones LREE/HREE (López-Escobar et al., 1995; Rawson et al., 2016). Además, exhibe escasa signatura de subducción y un alta pendiente de HREE (reflejada en un valor promedio para Sm/Yb de 3,12 y Sm/Lu de 21,48), interpretada como presencia de granate en la fuente, cuya estabilidad en la astenosfera se asocia a profundidades que no son consistentes con el espesor litosférico de la zona (<60 km; Tassara et al., 2006). Las características geoquímicas de elementos mayores y traza (e.g., bajo contenido de CaO para un MgO dado; Herzberg y Asimow, 2008), junto a modelos de fusión parcial sugieren la participación de piroxenitas en la génesis de los magmas, litología que estabiliza granate a profundidades menores que las peridotitas (e.g., Davidson et al., 2013; Kogiso et al., 2003; Lambart et al., 2016).

Nuevos antecedentes isotópicos de Sr, Nd y Pb muestran una signatura particular para el CVP; cuyas características principales son altos valores relativos de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, y bajos de ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd y ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb; que no ha sido reconocida otros centros eruptivos menores de la ZVS. Estas razones isotópicas muestran una tendencia muy marcada hacia el miembro extremo del manto denominado EM1 (enriched mantle 1), que en la literatura se ha interpretado como representativo de manto litosférico subcontinental (e.g., Turner et al., 2017). La importante variación en la participación de EM1, pese a la cercanía geográfica, y la mayor presencia de este componente en las rocas más enriquecidas en elementos incompatibles, permite interpretar que los magmas del CVP se generaron por la mezcla en proporciones variables de fundidos formados a partir de la fusión parcial de piroxenitas con granate en el manto litosférico subcontinental con fundidos provenientes de la astenosfera. Lo anterior permite sugerir la participación de litósfera en la formación de estos basaltos en la ZVS, en un proceso que comparte ciertas características genéticas con la formación de basaltos en el tras-arco.

Palabras Clave: Puyuhuapi, manto litosférico subcontinental, basaltos alcalinos, ZVS, Liquiñe-Ofqui.

Referencias:

- Davidson, J., Turner, S. and Plank, T., 2013. Dy/Dy*: variations arising from mantle sources and petrogenetic processes. *Journal of Petrology*, 54(3).
- González-Ferrán, O., Innocenti, F., Lahsen, A., Manetti, P., Mazzuoli, R., Omarini, R., & Tamponi, M., 1996. Alkali basalt volcanism along a subduction-related magmatic arc: the case of Puyuhuapi Quaternary volcanic line, Southern Andes (44°20'S), XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, Actas.
- Herzberg, C., Asimow, P.D., 2008. Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation. *Geochemistry, Geophys. Res.* 113, 10.1029/2007JB005387.
- Kogiso, T., Hirschmann, M.M., Frost, D.J., 2003. High-pressure partial melting of garnet pyroxenite: possible mafic lithologies in the source of ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.* 216, 603–617. [doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00538-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00538-7).
- Lambart, S., Baker, M.B., Stolper, E.M., 2016. The role of pyroxenite in basalt genesis: Melt-PX, a melting parameterization for mantle pyroxenites between 0.9 and 5 GPa. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121.
- Lopez-Escobar, L., Cembrano, J., & Moreno, H., 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46°S). *Revista Geológica de Chile* 22 (2).
- Rawson, H., Keller, T., Fontijn, K., Pyle, D., Mather, T., Smith, V. & Naranjo, J., 2016. Compositional variability in mafic arc magmas over short spatial and temporal scales. *Earth Planet. Sci. Lett.* 456.
- Stern, C., 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, vol. 31, No.2.
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schmidt, S., Hackney, R., 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *J. Geophys. Res.* 111.
- Turner, S.J., Langmuir, C.H., Dungan, M.A., Escrig, S., 2017. The importance of mantle wedge heterogeneity to subduction zone magmatism and the origin of EM1. *Earth Planet. Sci. Lett.* 472.

Depósitos de caída tempranos asociados al volcán monogenético La Poruña (~22°S): patrones geoquímicos en roca total, características texturales de olivino e inclusiones vítreas asociadas

Gastón Sáez¹⁻², Verónica Oliveros¹⁻², Pablo Salas Reyes¹⁻², Francisca Villalobos¹⁻²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

El volcán monogenético La Poruña (VLP) se encuentra ubicado en la región de Antofagasta, en el margen noroccidental del complejo volcánico Altiplano-Puna, sobre un basamento ignimbrítico del Mioceno tardío, dentro de un contexto de corteza continental engrosada de entre 50 -80km (Beck et al., 1996). Está conformado por un cono de escoria de ~140 m de alto y ~800 m de base, con un campo de lavas basalto-andesítico a andesítico que se extiende 8 km hacia el suroeste desde el cono piroclástico (González-Maurel et al., 2019; Marín et al., 2020). Estudios radiométricos señalan edades ⁴⁰Ar/³⁹Ar en roca total estimada de 110±50 ka, y en masa fundamental de 54±26 ka (Bertín & Amigo, 2019), 92±34 ka y 119±11 ka (González-Maurel et al., 2019).

Se ha descrito que la actividad eruptiva comenzó con la producción de material piroclástico asociado a estilos hawaiano, estromboliano y transicional, que construyó el actual cono de escoria, finalizando con actividad efusiva que culmina con el emplazamiento del campo de lavas (Marín et al., 2020). Y la extrusión de las lavas se divide en dos pulsos a partir de observaciones de campo y grado de meteorización diferencial (Marín et al., 2020; O'Callaghan & Francis, 1986).

Si bien existe una caracterización petrográfica y geoquímica robusta de las lavas (González-Maurel et al., 2019), junto a descripciones detalladas de las litologías superficiales que componen el cono de escoria (Marín et al., 2020), se desconocen las características composicionales, mineralógicas y texturales de los depósitos de caída tempranos asociados al emplazamiento del cono piroclástico. El acceso a esta información permitiría determinar una posible zonación química de los productos eruptivos, tal como se ha observado en otros volcanes monogenéticos (Salas et al., 2021; Németh, 2010).

Este trabajo propone el estudio detallado de los depósitos de caída tempranos preservados en los márgenes circundantes del cono eruptivo, donde se realizó una sección (S1) de 372 cm, compuesta por niveles mm a dm, formados principalmente por pómez negra, gris y verde, tamaño ceniza fina a bomba.

Se realizó un estudio petrográfico de 7 diferentes niveles de tefra en fragmentos tamaño lapilli y bomba a lo largo de S1, junto a análisis geoquímico de elementos mayores y traza por FRX. Además, las muestras de tefra fueron tamizadas en fragmentos de tamaño 0,125 a 32 mm, de modo de determinar el grado de explosividad y estilo eruptivo de los eventos ocurridos en VLP, según la metodología de Walker (1971). Las fracciones de tamaño 0,18 a 0,50 mm y 0,50 a 1,00 mm fueron seleccionadas para el estudio detallado, vía lupa binocular, de características texturales y morfológicas de cristales de olivino, plagioclasa y piroxeno. Sumado a eso, los olivinos fueron prospectados por la ocurrencia de inclusiones vítreas, para su posterior análisis por técnicas microanalíticas (EPMA, RAMAN, SIMS).

La petrografía de las muestras de tefra exhibe textura vitrofídica de vesicularidad entre 21-28%, con fenocristales de plagioclasa (~16%), olivino (~12%) y piroxeno (~9%), con masa fundamental compuesta por vidrio (~26%), microlitos de plagioclasa (~7%), olivino (~3%) y piroxeno (~2%). Se observan aglomerados minerales con plagioclasa, olivino y piroxeno, y algunos cristales de olivino con piroxenos adosados en su superficie. Del total de cristales de olivino, el ~15% muestran morfología esquelética. La caracterización mineralógica y textural de las tefras es equivalente a la de trabajos anteriores para las lavas del VLP (González-Maurel et al., 2019; Marín et al., 2020), lo que indica que el estudio de estos depósitos podría representar un aporte al conocimiento de las etapas eruptivas del volcán.

A partir de la observación a la lupa binocular, se observan niveles con un ~15% de cristales de olivino en la fracción seleccionada, con morfología poliedral a esquelética y un desarrollo de caras cristalinas moderado a bueno. En general, la madurez textural de los cristales de olivino es buena, sin observación de morfologías dendríticas. Se ve ocurrencia de inclusiones fundidas de entre 10 a 25 µm de coloración pardo oscuro a incoloras en alrededor del ~40% del total de olivinos y con presencia de burbuja de gas en la mayoría de ellas.

Los resultados de roca total permitirán aportar nuevos avances en el conocimiento de la actividad explosiva temprana asociada al emplazamiento del cono de escoria; mientras que la prospección morfológica y textural de olivino, junto al análisis de inclusiones fundidas permitirá estimar las profundidades y tasas de ascenso de los magmas. Finalmente, los resultados obtenidos serán discutidos en el contexto de los productos eruptivos emitidos en los estratovolcanes circundantes, donde se han descrito suites minerales similares.

Palabras Clave: volcán monogenético, La Poruña, inclusiones fundidas.

Financiamiento: Esta investigación se encuentra financiada por el Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes.

Referencias:

- Beck, S.L., Zandt, G., Myers, S.C., Wallace, T.C., Silver, P.G., Drake, L., 1996. Crustal thickness variations in the Central Andes. *Geology* 24 (5), 407–410. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>.
- Bertín, D., Amigo, A., 2019. Geología del volcán San Pedro, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, mapa escala 1:50.000. Santiago, Chile.
- González-Maurel, O., Godoy, B., le Roux, P., Rodríguez, I., Marín, C., Menzies, A., Bertín, D., Morata, D., Vargas, M., 2019a. Magmatic differentiation at La Poruña scoria cone, Central Andes, northern Chile: evidence for assimilation during turbulent ascent processes, and genetic links with mafic eruptions at adjacent San Pedro volcano. *Lithos* 338–339, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.033>.
- Marín, C., Rodríguez, I., Godoy, B. et al., 2020. Eruptive history of La Poruña scoria cone, Central Andes, Northern Chile. *Bull. Volcanol.* 82, 74. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01410-7>.
- O'Callaghan, L.J., Francis, P.W., 1986. Volcanological and petrological evolution of San Pedro volcano, Provincia El Loa, North Chile. *J. Geol. Soc. Lond.* 143, 275–286. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0275>.
- Salas, P., Ruprecht, P., Hernández, L. et al., 2021. Out-of-sequence skeletal growth causing oscillatory zoning in arc olivines. *Nat. Commun.* 12, 4069. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24275-6>.
- Walker, G.P.L., 1971. Grain size distribution of pyroclastic deposits. *J. Geol.* 79, 696–714. <https://doi.org/10.1086/627699>.

Evolución magmática y condiciones pre-eruptivas de los magmas emitidos por los centros eruptivos menores Cayutué – La Vigería, Región de Los Lagos, Chile

Solange Sánchez Kaiser¹, Javier Reyes¹, Fabián Parra², Luis E. Lara³⁻⁴, Rodrigo Mena⁵

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología

(2) AndesRock Geoconsultores SPA

(3) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias

(4) CKELAR Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico

(5) Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM

El campo volcánico Cayutué – La Vigería (CLV) (S41°10' – S41°30') está formado por al menos 7 grupos de centros eruptivos menores (CEM), principalmente conos de escoria y conos de toba, de edad Pleistoceno - Holoceno ubicados en las proximidades del lineamiento principal del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, en la Zona Volcánica Sur de los Andes, cerca de los volcanes Osorno y Calbuco.

Mediante nuevos antecedentes petrográficos, de geoquímica de roca total y química mineral en microsonda, este estudio busca determinar las condiciones petrogenéticas y patrones de ascenso y almacenamiento magmático para cada grupo de CEM dentro de CLV. Los productos volcánicos de CLV tienen composición basáltica a andesítico-basáltica, con firmas variables entre los distintos grupos de CEM y con patrones de REE compatibles con una fuente de Iherzolita con espinela. Las variaciones composicionales se asocian a diferencias en el aporte de fluidos de la placa subductante, con mayor aporte en los CEM Holocenos, y variaciones en la cristalización fraccionada (olivino $\pm$ clinopiroxeno $\pm$ plagioclasa $\pm$ óxidos de Fe-Ti). No se interpretan cambios considerables en los grados de fusión parcial ni en la influencia de contaminación cortical entre los diferentes CEM, con la excepción de Rollizos, un cono de toba con evidencias químicas de asimilación (visibles en razones de K/La, Ba/Th y Nb/Zr).

Mediante estimaciones geotermobarométricas en base a las ecuaciones de Wang et al. (2021) para fenocristales de clinopiroxeno, se calculan temperaturas de cristalización en el rango 1040 - 1153 °C ($\pm 36,6$ °C) y presiones entre 0,1 - 5,8 kbar ($\pm 1,66$ kbar) para CLV en general, con leves variaciones dependiendo del grupo en particular analizado. Lo anterior sugiere que todos los centros de emisión presentan al menos un reservorio transiente en la corteza superior, independientes entre sí, lo que impide la homogeneización, donde los magmas se diferencian principalmente por fraccionamiento que fueron afectados por ocasionales recargas magmáticas máficas dada la presencia de patrones de zonación normal e inversas reconocibles en diversos cristales.

Palabras Clave: Centros eruptivos menores, Geotermobarometría, Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui.

Morfometría, petrografía y análisis granulométrico del Volcán Paitur de 168 ka (27°06'S, 68°48'O), Andes Centrales, Chile

Carla Soto Escobar¹, Edmundo Polanco Valenzuela², Francisco Hevia Cruz³

(1) Carrera de Geología, Universidad Nacional Andrés Bello (UNAB), Av. República 250, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

(3) Université Paris-Saclay, Laboratoire GEOPS, UMR8148, F-91405, Orsay, Francia

En la Región de Atacama (Chile) se ubica el Volcán Paitur (27°06'S, 68°48'O y 5194 m.s.n.m.) de 168 ka (Gardeweg *et al.*, 2000), que forma parte del Complejo Volcánico Nevado Tres Cruces (CVNTC) y del Parque Nacional Nevado Tres Cruces. Este centro eruptivo corresponde a un anillo de tobas, cuya morfología es de gran interés ya que refleja la ocurrencia de hidrovolcanismo (interacción agua-magma) en la zona de estudio. Con el propósito de poder estudiar con mayor detalle este anillo de tobas y los distintos depósitos volcanoclásticos que lo conforman, se seleccionaron y recolectaron cinco muestras (OSE27A,B,C,D,E) de algunos de ellos para la elaboración de cortes transparentes y cinco muestras (OSE27A,B,C,D,G) para la realización de análisis granulométricos en el Laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería. El análisis petrográfico de los cortes transparentes disponibles indica principalmente que los depósitos son de composición dacítica con pómez con fenocristales de plagioclasa-biotita±anfíbola-cuarzo y óxidos de Fe-Ti. Por otra parte, a partir de los análisis granulométricos realizados en las muestras seleccionadas, fue posible estimar distintos parámetros, tales como: asimetría, curtosis, esfericidad, media y moda, en donde se realizaron distintos histogramas, los que fueron de gran utilidad para poder comprender cada uno de los procesos explosivos que dieron origen a los niveles de estos depósitos, en donde la diferencia en el tamaño de los fragmentos y la potencia de cada uno de los niveles, indican la variación de la explosividad y extensión de cada evento. Además de los dos análisis ya mencionados, también se realizaron estudios estratigráficos y morfométricos, con el fin de poder identificar distintas estructuras como las marcas de impacto, contactos y tipos de fragmentos (pómez, líticos y vidrio volcánico) en los niveles de la columna estratigráfica asociados a este anillo de tobas, tomando en cuenta estas características y sobre todo los fragmentos de grano fino, se sugiere que estos depósitos habrían sido formados por procesos asociados a corrientes de densidad piroclásticas diluidas (CDPs). Del estudio morfométrico y la realización de perfiles de elevación fue posible conocer el valor de las pendientes internas del cráter (0,2°-29,8°), el diámetro de este (1,1 km) y del domo anidado en su interior (0,2 km), además de la altura máxima del volcán (5.194 m.s.n.m.). Considerando cada uno de los resultados obtenidos de los análisis, es posible establecer que este volcán corresponde a una estructura monogenética con una morfología de anillo de tobas. Además, al tomar en cuenta la relación de los fragmentos y espesores de cada nivel es posible establecer que hay niveles que presentaron una mayor explosividad que otros, como es el caso de los niveles B y D en donde el tamaño de sus fragmentos es mucho menor a los niveles A, C y G y esto se evidencia en las muestras mencionadas.

Palabras Clave: Paitur, Monogenético, Freatomagmático.

Petrografía y variación geoquímica del clúster monogenético La Negrillar (Andes Centrales, Chile)

Felipe Valdebenito Molina¹, Matías Espinoza-San Martín¹, Patricia Larrea Márquez¹⁻², Sergio Salinas Sánchez³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Nacional de México, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria CP. 04510, Ciudad de México, México

Debido al contexto tectónico de subducción de Chile, éste presenta volcanismo activo a lo largo de su territorio, actividad que no solo se restringe al volcanismo poligenético, sino que también a la formación de conos, clústeres y campos monogenéticos, por lo que su estudio es de vital importancia para comprender la diversidad volcánica del país. Uno de estos clústers es el conjunto monogenético de La Negrillar (LN). Ubicado en la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) (68°37'O 24°18'S), al oeste del depósito de avalancha de escombros del volcán Socompa y del campo monogenético El Negrillar (68°25' O, 24°18' S).

Existen escasos trabajos previos de LN; inicialmente fue descrito como un campo con seis centros eruptivos de composición andesítico-basáltica [1], posteriormente en un estudio regional del vulcanismo monogenético de la zona se incluyó una muestra perteneciente a uno de los flujos de lava, que confirmó esta composición [2]. El estudio más reciente en el área describe a LN como un clúster con tres centros eruptivos compuesto por lavas andesíticas, basálticas y dacíticas con edad entre 1,4±0,5 Ma (edad K/Ar en masa fundamental) y 0,54±0,05 Ma (edad ⁴⁰Ar/³⁹Ar en masa fundamental) [3]. Recientemente, este grupo de investigación redefinió el clúster y determinó que LN está conformado por dos centros eruptivos, La Negrillar Oeste (LNO) y La Negrillar Este (LNE), con cinco flujos de lava asociados. La actividad comenzó en LNO emitiendo tres flujos para luego emitir dos desde LNE, donde las primeras fases eruptivas de cada centro fueron emplazadas hacia el norte mientras que los flujos posteriores se distribuyeron hacia el sur.

Este estudio se centra en determinar la evolución geoquímica del clúster LN, para eso se realizó un estudio petrográfico de las lavas del clúster las cuáles presentan texturas afaníticas y microporfíricas con ~20% de fenocristales de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa, de tamaños comprendidos entre los 0,2-1 mm, inmersos en una masa fundamental constituida por abundantes microlitos de plagioclasa, piroxeno (<0,1mm) y vidrio. Destaca la presencia de texturas de flujo en estos microlitos. El estudio de la geoquímica de roca total de los flujos de lava indica que la composición de estos centros eruptivos varía desde andesítico-basáltica a dacítica (SiO₂ = 55,49 a 63,46 wt. %), donde los flujos más primitivos fueron los primeros productos emitidos por el clúster, correspondientes a LNO, los cuales fueron evolucionando con el tiempo hasta la composición dacítica emitida por LNE. Una tendencia evolutiva similar se observa en los diagramas bivalentes que muestran una disminución de MgO, FeO, TiO₂ y P₂O₅ y un aumento en el contenido de K₂O, Al₂O₃, Na₂O con el aumento de SiO₂. De acuerdo con esta variación, los elementos traza muestran un aumento de Ba, La, Pb, Pr, Rb y una disminución de Sr, Ta, Ce, Lu con el aumento de SiO₂ de los primeros a los últimos flujos emitidos. El diagrama multielemental muestra patrones típicos de magmas de arco con anomalía positiva en Pb y Sr, y anomalía negativa en Nb-Ta.

Este trabajo será el primer estudio geoquímico a este nivel de detalle en LN; gracias a los datos obtenidos en su contexto temporal, se construirá un modelo evolutivo de la actividad del clúster en el que se reconocerán los procesos involucrados en su evolución magmática.

Palabras Clave: Volcanismo, Elementos Traza, Isótopos, Evolución Magmática, Magmas de Arco.

Financiamiento: Trabajo financiado por proyecto FONDECYT de iniciación n° 11200293, "Evolution of a mafic monogenetic volcanic field within the main arc of the Central Andes (Northern Chile)".

Referencias:

- [1] Gardeweg, M., Cornejo, P., Davidson, J. 1984. Geología del volcán Lullillaco, Altiplano de Antofagasta, Chile (Andes Centrales). Revista Geológica de Chile, Vol. 23, p. 21-37.
- [2] Hoffman, C. (2011). Petrografía y geoquímica de los conos del campo de lavas Negros de Aras (23°57'-24°26' Lat.S y 67°57'-68°42' Lon.O) al norte del volcán Socompa, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra. 114. Pp.
- [3] Solari, M., Venegas, C., Montecino, D., Astudillo, N., Cortés, J., Bahamondes, B., Araya, C., & Espinoza, F. (2017). Geología del área Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 191:88 pp., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago

Prospección de olivino y caracterización de las morfologías cristalinas e inclusiones vítreas en los depósitos tempranos de tefra del volcán Cerro Overo

Francisca Villalobos¹⁻², Pablo Salas¹⁻², Verónica Oliveros¹⁻², Gastón Sáez Henríquez¹⁻²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

El maar Cerro Overo es un volcán monogenético (23,5°S) situado a 18 km al SE del Volcán Lascar, dentro del Complejo Volcánico Altiplano-Puna, en la Región de Antofagasta. Formado hace $<77 \pm 7,8$ Ka (U-Th/He en circón; van Alderwerelt et al., 2021) sobre las ignimbritas Tuyajto y Cajón, como el resultado de erupciones explosivas-efusivas y actividad freatomagmática (Ureta et al., 2021).

Sus productos eruptivos se constituyen por depósitos piroclásticos y un delgado manto de lavas de composición andesítico-basáltica (54,6% SiO₂, 7,35%MgO; van Alderwerelt et al., 2021). La petrografía indica la presencia de abundantes fenocristales de olivino forsterítico (15% vol.; núcleos: Fo₈₆; bordes: Fo₇₉) caracterizados por sus texturas tabulares e inmersos en una masa fundamental vítrea, compuesta por microcristales de plagioclasa, olivinos y en menor medida clinopiroxenos (van Alderwerelt et al., 2021).

Los fenocristales de olivino forsterítico, contienen inclusiones vítreas cuyas composiciones abarcan un mayor rango que la roca caja, clasificadas en tres grupos: basáltica calco-alcalina; andesítico-basáltica de composición casi equivalente a la roca caja; y composiciones félsicas dacíticas a riolíticas (van Alderwerelt et al., 2021).

De acuerdo con Ureta et al. (2021), el desarrollo de los eventos eruptivos de Cerro Overo se distinguen por un transición corta y continua de la actividad explosivo-efusiva a una actividad freatomagmática, predominando un estilo eruptivo estromboliano con un ascenso rápido y turbulento de asimilación (ATA; Kerr et al., 1995).

El objetivo principal de este estudio radica en emplear morfologías cristalinas de los olivinos y las inclusiones fundidas vítreas atrapadas en ellos con el fin de obtener indicadores preliminares de las velocidades de ascenso y tiempos de residencia del magma emitido por el volcán Cerro Overo.

Se llevó a cabo una columna en el flanco SE del cráter de Cerro Overo, la cual permitió describir en detalle niveles no documentados para la historia evolutiva temprana de Cerro Overo.

Desde la columna se identificó niveles basales con potencias de hasta 12 cm de ceniza y lapilli, con dominancia de material proveniente de la roca caja. De este modo fue posible evidenciar un depósito típico asociado a la construcción de un maar, consistente en un nivel basal de origen freático, que subyace al material magmático piroclástico juvenil (Houghton et al., 2015). Para una caracterización más detallada, se realizó un muestreo selectivo de fragmentos de pómez en diferentes niveles, para ser sometidos a análisis petrográfico y de elementos mayores/ traza vía FRX.

Paralelamente, se procedió al tamizado de las muestras de tefra recolectadas de varios niveles de la columna, utilizando un rango de tamaño de partícula entre 0.18 mm y 1 mm. Posteriormente, se realizó un análisis macroscópico bajo la lupa binocular con el objetivo de identificar y caracterizar los patrones texturales y morfológicos de los cristales de olivino. Durante este análisis, además, se prospectaron inclusiones vítreas para ser analizadas vía técnicas microanalíticas (EPMA, RAMAN, SIMS) en etapas posteriores.

En base a la observación se ha podido determinar una predominancia de cristales con texturas esqueléticas y en transición a texturas poliedrales, identificando en menor medida patrones dendríticos. La abundancia de estos fenocristales disminuye en las primeras etapas del evento eruptivo, lo que respalda la noción de un comportamiento freático en las fases iniciales. Este comportamiento se atribuye a la menor contribución de material juvenil y a la prevalencia de fragmentos de la roca encajante.

En lo que respecta a las inclusiones fundidas, se presentan abundantemente en los cristales de olivino, con tonalidades marrón y translúcidas. Las cuales adoptan formas alargadas, triangulares u ovaladas, y en su mayoría están acompañadas por una burbuja de gas.

Estas características texturales en fenocristales de olivino también han sido observadas en otros volcanes monogenéticos de los Andes, como el Volcán Hornitos (Salas et al., 2021), exhibiendo formas cristalinas dendríticas, esqueléticas o poliedrales, que siguen patrones de zonación discontinua. Esto como respuesta a un pronunciado undercooling evidenciado en las texturas presentes en los cristales, propiciando el atrapamiento de inclusiones fundidas primarias en los cristales de olivino (Metrich et al., 2008). Por lo que estos resultados permitirán una comprensión más detallada de la evolución de los eventos eruptivos, complementando el modelo propuesto por Ureta et al. (2021).

Palabras Clave: olivino, inclusiones fundidas, maar, volcanes monogenéticos, basaltos.

Financiamiento: Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes.

Referencias:

- B. van Alderwerelt, Brennan & Ukstins, I.A. & Ramos, F.C. (2021). Sr isotopes and geochemistry of Cerro Overo maar provide a unique window into magma genesis in the Central Volcanic Zone arc of the Andes. *Lithos*. 386-387. 105978. (2021).
- Houghton, B., White, J.D.L., Van Eaton, A.R., (2015). Phreatomagmatic and Related Eruption Styles. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., McNutt, S. (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes*, pp. 537–552. (2015).
- Metrich, Nicole & Wallace, P. (2008). Volatile Abundances in Basaltic Magmas and Their Degassing Paths Tracked by Melt Inclusions. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry - REV MINERAL GEOCHEM*. 69. 363-402. (2008).
- Salas, P., Ruprecht, P., Hernández, L. et al. (2021). Out-of-sequence skeletal growth causing oscillatory zoning in arc olivines. *Nat Comun* 12, 4069 (2021).
- Ureta, G., Németh, K., Aguilera, F. et al. (2021). A window on mantle-derived magmas within the Central Andes: eruption style transitions at Cerro Overo maar and La Albóndiga lava dome, northern Chile. *Toro Volcán* 83, 19 (2021).

Historical monogenetic eruptions in subduction zones: Mirador (1979, Chile) and Parícutin (1943, Mexico) volcanoes, differences, and similarities

Valentina Villanueva Morales¹, Deborah Cáceres Baez¹, Débora Morales Soto¹, Patricia Larrea Marquez¹⁻², Sergio Salinas³, Lucas Sanhueza Lara¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

Monogenetic volcanoes occur in different tectonic contexts, and subduction zones are not the exception. This is the case of two monogenetic cones in different subduction zones: Mirador in Chile and Parícutin in Mexico, both historic and last eruptions from their volcanic fields. The aim of this work is to conduct a comparative study between these eruptions in terms of products, eruptive styles, extension, effusive rates, and present seismic activity, emphasizing that both occur in a similar subduction context with fractional crystallization as the dominant process responsible for the magmatic differentiation ([1] and [2], respectively). The Mirador scoria cone (April - May, 1979), located in the Andean Southern Volcanic Zone (SVZ), within the Carrán-Los Venados distributed volcanic field (CLVVF) in Chile, corresponds to volcanism associated with the subduction of the Nazca plate beneath the South American plate; while the Parícutin scoria cone (February, 1943 - March, 1952) located in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF) in México, is the result of the subduction of the Cocos plate under North American plate. About crustal thickness, the South American Plate has 40 km [3] of maximum thickness, while the North American plate is similar, about 35-40 km [4].

Comparatively, about their eruptive styles, both volcanoes exhibited strombolian activity; Mirador shows a more restricted fallout distribution, mostly towards the E, with a maximum of ~1 cm of ash fallout deposit at 6 km of the cone [5]; in comparison Parícutin reports up to 30 cm of thickness at 10 km of distance [6]. The amount of ash emitted is related to the duration of the explosive phase. In Mirador, the duration of the explosive activity was 37 days, while the emission of pyroclastic material at Parícutin was constant during the first 3 years. In both cases, the explosive activity gradually became more effusive with time. For Mirador the aa-type lava flows were mainly emitted to the SSW, determined by the horseshoe-shaped crater; however at Parícutin, 23 effusive phases [7] were emitted mainly from the base of the cone and directly associated with the orientation of the initial fissure. Also, about the lava volume emitted, for Mirador 0.003645 km³ were reported, with an effusive rate of 6.5 x 10⁹ m³/s [5]. While Parícutin has a lava flow volume ranging between 1.59 and 1.68 km³ DRE with a magma effusion rate between 2 and 14 m³/s [7].

The regional context of both volcanoes shows successive reactivations in recent times. In the CLVVF there have been repeated eruptions in the last 150 years (the 1907 Riñanahue and 1955 Carrán maar-type eruptions, and the 1979 Mirador cone), with volcano-tectonic seismic activity reported by SERNAGEOMIN in 2010. In the MGVF the timespan between the eruptions is longer (1759 Jorullo and 1943 Parícutin) but repeated seismic swarms have occurred in the last years (the most recent one in 2021 [8]). Accordingly, in both volcanic fields, possible future eruptions may occur in close proximity to the locations of the most recent historical eruptions.

The high density of volcanic edifices or eruptions in these areas is noteworthy. The Mirador area shows 0.89 vents/km², for Parícutin 0.2 vents/km² (slightly higher than other areas within the MGVF). This suggests that future eruptions are likely to happen, potentially with shorter duration in the Mirador zone and larger volumes in the Parícutin region. Finally comparative studies could point to key aspects of subduction anatomy, magma ascent and hazard scenarios, implying a possible similar scenario in both distant places.

Keywords: historic volcanism, volcanic hazards, young scoria cone.

Financing: This work was supported by the National Science Foundation (NSF) EAR 1853006 awarded to Dr. E. Widom and P. Larrea. Patricia Larrea was supported by Proyecto de Instalación Académica - FCFM, Universidad de Chile (2019-2023) and Proyecto N°0285/2022 from Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo (VID) - Universidad de Chile.

Acknowledgments: Thanks to the Petro UChile Team for encouraging us in this project.

References:

- [1] Castro, A. (2015). Caracterización petrográfica y geoquímica de los productos de la erupción del volcán Mirador (AD 1979), Carrán-Los Venados, Chile. Evidencias de volcanismo poligenético en un campo de conos monogenéticos. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 118 pp.
- [2] Larrea, P., Widom, E., Siebe, C., Salinas, S., & Kuentz, D. (2019). A re-interpretation of the petrogenesis of Parícutin volcano: Distinguishing crustal contamination from mantle heterogeneity. *Chemical Geology*, 504(November 2018), 66–82.
- [3] Tassara, Andrés, & Yáñez, Gonzalo. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47°S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186.
- [4] Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149.
- [5] Moreno, H. 1980. La erupción del Volcán Mirador en Abril-Mayo de 1979, Lago Ranco-Riñanahue, Andes del Sur. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones N°28, p. 1-23.
- [6] Erlund, E. J., Cashman, K. V., Wallace, P. J., Pioli, L., Rosi, M., Johnson, E., & Granados, H. D. (2010). Compositional evolution of magma from Parícutin Volcano, Mexico: The tephra record. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1–4), 167–187.
- [7] Larrea, P., Salinas, S., Widom, E., Siebe, C., & Abbitt, R. J. F. (2017). Compositional and volumetric development of a monogenetic lava flow field: The historical case of Parícutin (Michoacán, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 348, 36–48.
- [8] Legrand, D., Pertot, M., Macías, J.L. et al. (2023). Repeated seismic swarms near Parícutin volcano: precursors to the birth of a new monogenetic volcano in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, México? *Bull Volcanol* 85, 30.

Mechanical layering and layer inclination controls on magma chamber induced stress

John Browning¹, Matías Clunes Squella¹, Carlos Marquardt¹, Agust Gudmundsson², Jose Cembrano¹, Janine Kavanagh³

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile

(2) Royal Holloway, University of London

(3) University of Liverpool

The distribution of stress surrounding a shallow magma chamber presents a first order control on both the position of magma chamber rupture and the resulting direction of any dyke, sill or inclined sheet that is formed. As such, knowledge relating to the stress field surrounding magma chambers and at the near surface are vital for correctly assessing the likely location of magma injection and eventual eruption position. The vast majority of models used to estimate the crustal stress field during periods of magma inflation either assume that the crust is homogeneous, an elastic half-space, or heterogeneous but simplified to a series of horizontal layers with often contrasting mechanical properties. Using finite element method (FEM) analysis we expand on those assumptions so as to consider a magma chamber hosting a crustal segment composed of heterogeneous layers of contrasting mechanical properties and with variable dip angles. Two magma chamber geometries are considered, the first an idealised circle (sphere in three dimensions) and the second, a sill-like ellipse (ellipsoid in three dimensions). The main boundary condition considered is an overpressure of 10 MPa in the chambers which is used to generate the resulting stress field. Layer inclinations (dip) alter between horizontal to vertical with model simulations performed at 20-degree inclination variations. The layer heterogeneity is governed by differences (contrasts) in each layer's elastic moduli (stiffness). We tested stiffness ratios of 100:1, 10:1, 1:1 (homogeneous case), 1:10 and 1:100.

Results confirm previous insight from heterogeneous crustal modelling indicating high stiffness ratios generate significantly perturbed stresses within different layers and can lead to local stress rotations at the contact between two mismatched or contrasting layers. The effect of the layer inclination further perturbs the stress field and shift the location of maximum stress concentration by several hundreds of metres to kilometres preferentially in the direction of the layer dip. Our results confirm the need to accurately characterize both subsurface magma chamber geometries and the mechanical properties and attitude of the layers that comprise a volcano. This is especially important in the Andes where volcanoes are often built atop heterogeneous crust that has been deformed and folded, generating highly non-horizontal stratification.

Keywords: Volcanoes, Stress, Heterogeneity, Magma Chambers, Dikes.

Financing: Fondecyt 11190143.

Dike-induced ground deformation influenced by mechanical layering and rock layer inclination

Matías Clunes Squella¹, John Browning¹⁻², Carlos Marquardt², Jorge Cortez¹, Kyriaki Drymoni³, Janine Kavanagh⁴

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(3) Università degli Studi di Milano-Bicocca, Department of Earth and Environmental Sciences, 20126, Milan, Italy

(4) University of Liverpool, School of Environmental Sciences, L3 5DA, Liverpool, United Kingdom

Ground deformation measurements due to magma emplacement into the crust typically refer to the depth, volume, shape, and orientation of intrusive bodies such as dikes. In particular, constraining the magnitude and lateral extent of ground deformation induced by dike emplacement are important to identify potential eruption characteristics. The vast majority of ground deformation inversions made for volcano monitoring during volcanic unrest assume that dikes are emplaced in an elastic half-space, i.e., a homogeneous and isotropic crust, or a heterogeneous crust made of horizontal layers with different mechanical properties (Young's modulus and Poisson ratio). However, neither horizontal layers nor homogeneous rock strata are common in stratovolcanoes or crustal segments that have been folded by tectonic forces. To address this omission, we designed a novel set of two-dimensional finite element method numerical simulations and analogue experiments that consider dike-induced surface deformation related to a mechanically heterogeneous crust with inclined layers. Our numerical model results show that layer inclination can produce localized ground deformation that may be as much as 40 times higher in terms of deformation magnitude than would be expected in a non-layered model, depending on the angle of bed inclination and the stiffness of the rock units that host and are adjacent to the dike. The asymmetrical surface deformation patterns generate deformation peaks located as much as 1.4 km away from those calculated in non-layered models. These deformation patterns are similar to those found in a series of new gelatine analogue experiments, where a vertical dike propagating into a homogeneous analogue crust also generates asymmetrical ground deformation. Our results highlight the necessity of accurately quantifying both the mechanical properties and attitude of the geology underlying active volcanoes. They also improve the inclination of different deformation signals that correspond to magmatic processes (i.e., short-term unrest, long-term resurgence) that are especially important in the Andes, where dikes often encounter mechanically heterogeneous and inclined rock layers during their way to eruption.

Keywords: volcano deformation, volcano heterogeneity, finite element method, magmatic intrusion.

Acknowledgments: We thank ANID through FONDECYT projects 11190143 and 1210591, the scholarship ANID 21202065, the Clover 2030 Open-Seed Fund, and UKRI Future Leaders Fellowship MR/S035141/1.

Dike propagation through inclined heterogeneous crustal layers: observations from analogue models using gelatine and water

Matías Clunes Squella¹, Janine Kavanagh², John Browning¹⁻³, Caitlin Chalk²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(2) University of Liverpool, School of Environmental Sciences, L3 5DA, Liverpool, United Kingdom

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

Gelatine, as an elastic and transparent crustal analogue, and water as a magma analogue, can be used for modelling the dynamics of magma plumbing systems and the transport of magma within dikes and sills. To date, most analogue experiments of dike propagation in gelatine simulate the crust as either a homogeneous solid or as heterogeneous with horizontal layers. This is likely a simplification for areas that have experienced orogenesis and crustal folding, and generally for magma intrusions which propagate through dipping layers in volcanic edifices, such as stratovolcanoes or calderas.

Here we present the results of novel gelatine experiments that expand the scope of prior works by considering a medium in which dikes propagate in an analogue crust that is heterogeneous in rigidity and comprises one inclined contact between two layers. The experimental setup consists in two layers of gelatine (E1 for the lower layer and E2 for the upper layer) with contrasting stiffnesses (stiffness ratios of approximately 0.5 and 2) separated by an interface inclined at 45°. The interface between the layers was modeled as mechanically strong or weak depending on the gelatine preparation procedure and located directly above the central injection port of the tank or with an offset of 4-5 cm. The interface was created using a metal mould and the stiffness contrast between the gelatine layers was reached through varying the gelatine concentration during mixture preparation and varying the cooling time. Water was injected into the base of the tank to create a fluid-filled penny-shaped dike which propagated through the gelatine layers. Dike growth was monitored using HD video cameras in a direction perpendicular and parallel to the strike of the dike, and also above the tank to monitor the free surface of the gelatine. In the direction perpendicular to the strike of the dike, gelatine photoelasticity was used to visualize the evolution of the propagating dike-induced stress field by attaching polarized sheets at the sides of the experiment tank. During the injection, surface elevation changes were monitored using an overhead laser scanner. Sub-surface strain evolution was also monitored using digital image correlation in experiments with gelatine seeded with fluorescent passive-tracer particles that are illuminated by a laser sheet.

Our experiments show that the presence of inclined and mechanically heterogeneous layers influences dike growth and geometry and dike-induced subsurface stresses, strains and surface deformation. When the experimental dike reaches the interface between a stiff lower layer and a soft upper layer, the propagation velocity increases, the dike continues to propagate vertically and the subsurface stresses and strains are asymmetrically distributed. At this moment, a necking of the dike length is observed as it crosses the interface. When instead the experimental dike reaches an interface between a soft lower layer and a stiff upper layer, the propagation velocity remains almost equal, but stresses and strains are also asymmetrically distributed. For this scenario, the dike changes its direction of propagation from vertical to parallel to the inclined interface between the layers. A necking of the dike is also observed, but after the dike reaches the interface, and hence, closer to the eruption. For all the experiments analysed with the overhead laser an asymmetrical surface deformation pattern is observed close to the eruption. This effect is more pronounced for those dikes that first propagate through a soft lower layer and then through a stiff upper layer.

These results highlight the importance of considering layer inclination and heterogeneity during analysis of stress fields induced by magma intrusions and for studies conducted to characterize sources of deformation through inversions of surface deformation signals during periods of volcanic activity.

Keywords: analogue modeling, volcano deformation, volcano heterogeneity, magmatic intrusion, volcano stress.

Acknowledgments: We thank ANID through FONDECYT projects 11190143 and 121.0591, the scholarship ANID 21202065, the Clover 2030 Open-Seed Fund, and UKRI Future Leaders Fellowship MR/S035141/1

Evidencias de Transiciones graduales y estilos Explosivo-Efusivo mixto en erupciones riolíticas pre-históricas

Alan Inostroza Urzúa¹, Claudio Contreras¹⁻², Alison Rust²

(1) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

(2) School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, UK

Los grandes complejos volcánicos silíceos pueden generar desde devastadoras ignimbritas capaces de cubrir miles de kilómetros cuadrados, columnas piroclásticas que alcanzan la estratosfera, hasta flujos de lava y piroclastos de alcance kilométrico. Debido a su baja frecuencia, la reconstrucción de las propiedades físicas de erupciones prehistóricas permite mejorar los sistemas de monitoreo volcánico y los planes de mitigación en volcanes actualmente activos. El complejo volcánico Laguna del Maule se ha convertido en un importante objeto de estudio debido al gran número de diversos depósitos volcánicos riolíticos que evidencian un amplio rango de estilos eruptivos. En este trabajo, se utilizan piroclastos juveniles provenientes de diferentes niveles del depósito de caída de Los Espejos para reconstruir sus características físicas con respecto al tiempo. Se clasifican componentes y se mide su densidad, y mediante la utilización de imágenes microscópicas se analiza las texturas y densidad de número de vesículas en piroclastos juveniles para evaluar el rol de la tasa eruptiva en la formación de obsidiana silíceica y en la transición de una fase Pliniana moderada a una efusiva. El depósito de caída de Los Espejos está formado principalmente por clastos de pómez de alta densidad ($800-1.400 \text{ kg/m}^3$) y clastos vesiculados de obsidiana ($1700-2200 \text{ kg/m}^3$). Los clastos de pómez presentan vesículas alargadas, levemente orientadas y con bordes rectos. En general, la porosidad promedio disminuye con el tiempo y el número por unidad de área de vesículas disminuye con la disminución de porosidad de los piroclastos. Todo esto sugiere que durante el ascenso de magma, la tasa de ascenso fue disminuyendo, resultando en un mayor control de la deformación, localización de cizalle, colapso de burbujas y densificación del magma. Así, la formación de obsidiana fue gradual y creciente, pasando de una fase Pliniana moderada, a una mixta de columna eruptiva moderada y formación de flujo de lava. Este trabajo sugiere que el análisis textural de piroclastos juveniles permite reconstruir físicamente erupciones prehistóricas y se convierte en una técnica complementaria a la tefroestratigrafía. Además, se aumenta las evidencias que las transiciones eruptivas silíceas pueden ser graduales, o incluso, diferentes estilos eruptivos pueden ser simultáneos lo que impacta en las estrategias de monitoreo y en la mitigación de peligros volcánicos.

Keywords: Complejo volcánico Laguna del Maule, Sistemas volcánicos silíceos, Transiciones eruptivas silíceas, Dinámica de ascenso de magma, Análisis texturales de vesículas.

Rapid growth and catastrophic destruction events of Planchón Volcano

José Antonio Naranjo¹, Jorge Romero Moyano¹⁻², Juan Pablo Contreras¹, Yuji Orihashi³, Kevin Scott⁴, Miguel Haller⁵, Sumino Hirochika⁶

(1) Departamento de Geología Regional, Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

(3) Global Environment and Disaster Prevention Sciences, Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 1 Bunkyo-cho, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

(4) Cascade Volcano Observatory, United States Geological Survey, Vancouver, Washington, United States

(5) Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Boulevard Brown 3051, 9120 Puerto Madryn, Argentina

(6) Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-0041, Japan

Introduction

Lateral flank failures are catastrophic events that involve a sector collapse of volcanic edifices resulting in volcanic debris avalanche deposits (VDADs) which correspond to massive chaotic breccias with characteristic hummocky morphology composed of detritic material with highly variable grain size. Confined avalanches along surrounded valleys show more extended runout (45–90 km) compared to unconfined ones (<45 km), but also thicker deposits (50–100 m), increasing volcanic hazard in distal areas (e.g. Scott et al., 2001; Romero et al., 2021; 2022 and references therein). Planchón volcano (35.2°S, SAVZ) corresponds to a monotonous basaltic Pleistocene-Holocene edifice (Tormey et al., 1989; Naranjo et al., 1999), that forms the northern part of the Planchón-Peteroa volcanic complex (PPVC; Fig. 1). Planchón sourced the Planchón-Teno Debris Avalanche Deposit (PTDAD), and exhibits a distinctive partially destroyed atypical avalanche caldera that is open to the south instead of to the west where the avalanche deposit was emplaced (Naranjo et al., 1999). The volcano-stratigraphy and paleo-environmental conditions are here updated, the triggering mechanisms suggested and the hazard considerations for similar volcanic systems contemplated.

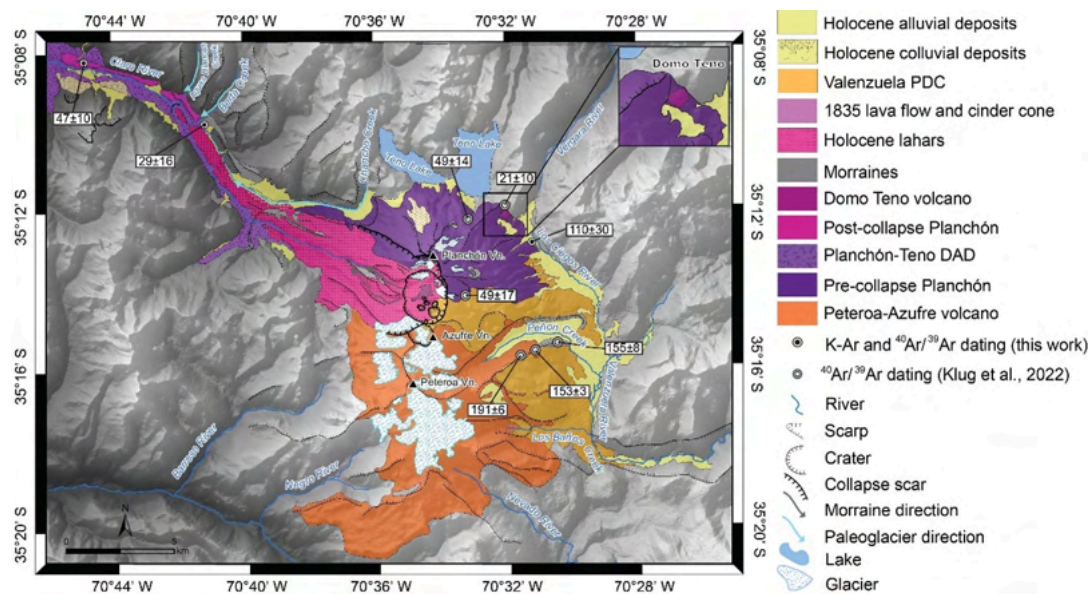


Fig. 1 Geologic map of the Planchón-Peteroa volcanic complex. Ages are given in ka. The DEM was acquired from the ALOS-Palsar mission, with 12.5 m spatial resolution.

Geology and volcanology

PPVC lies on NNE-trending belts of folded and thrust marine sedimentary sequences and volcanic rocks of Upper Jurassic to Cretaceous age to the east, and sedimentary, volcanic, and volcanoclastic rocks intruded by granodioritic stocks with Cenozoic age to the west (Naranjo et al., 1999). Major structural systems include the El Fierro fault system (EFFS) and Infiernillo-Los Cipreses faults (ILCF). The EFFS is a NNE-SSW reverse fault dipping 45–50° to the west (Piquer et al., 2010), while to the west, ILCF corresponds to several minor reverse faults, developing NE-SW and N-S trending structures dipping 65–70°W. We infer a remarkably more complex structural network for fluid circulation including a significant number of mainly N-S trending and conjugate structures.

The Planchón volcano (35.2°S, 70.6°W, 3,977 m asl) corresponds to the northern limit of the PPVC. Peteroa-Azufre is a deeply eroded Upper Pleistocene volcanic edifice active between ~300 and 150 ka (Klug et al., 2022; Fig. 1). The Planchón volcano is mainly composed of alternating lava flows and pyroclastic deposits with basaltic, basaltic andesite and scarce dacitic composition reaching up to 68 km³ (Tormey et al., 1989; Naranjo et al., 1999). Its initial stage consists of a dominantly effusive pre-collapse basaltic-basaltic andesite edifice (25–30 km³) that was built during the Upper Pleistocene (153–49 ka; Klug et al., 2022). This edifice collapsed catastrophically, producing the extensive Planchón-Teno debris avalanche (PTDA) reaching a 95 km runout to the west (Naranjo et al., 1999). Further volcanic activity concentrated within the collapse scar (Upper Pleistocene) with almost undistinguishable compositional or eruptive style variations during the post-collapse stage (3.5 km³).

Holocene eruptive activity through a series of summit vents has fed magmatic (e.g. Valenzuela tuff, Los Baños Pumice and the 1837 pyroclastic cone and lava flow), phreatic and phreatomagmatic eruptions (Fig. 1).

New constraints on the Pleistocene sector collapse of Planchón volcano

The original shape of the avalanche caldera has been masked, exhibiting an irregular expression (Naranjo et al., 1999). The escarpment is more evident in the northern part, with a maximum crater rim height of 3,935 m asl, which exhibits a ~1.5 km across amphitheater, open to the south. A saddle segment at 3,480 m asl, 455 m lower than the northern scarp is presented on the eastern edge. To the SW, the discontinuous collapse scarp reaches a height of 3,655 m asl at the expense of the ancient Azufre Volcano. Down the Río Claro to the WNW, only the northern escarpment can be seen as the southern one was obliterated by glacial erosion (Fig. 1).

The PTAD proximal outcrops display maximum exposed thicknesses between 30 and 50 m. Deposits found nearby Los Queñes reach up to an altitude of 950 m asl which means a topographic run-up of 270 m to the east. In the Central Valley, to the west, the deposit is ca. 25 m-thick and forms a 16-km wide and 28-km long debris fan, which extends to the town of Teno and the lower slopes of the Coastal Cordillera near Rauco, 175 m asl. The fan margins developed 5-10 m high lateral levées with 2-3 km wide and a main central channel of 9 to 10 km wide. A revised volume considering an average thickness of ca. 23 m yields a more accurate estimation of 8.6 km³ for the Planchón-Teno debris avalanche deposit (PTDAD). Hummocks are mainly located in the lateral banks (levées) of the distal fan, the front of the avalanche where it collided with the Coastal Cordillera, and lately in the northern bank of Teno River near Culenar, 6 km west of Los Queñes.

The best limit to the minimum age of the avalanche is provided by the presence of glacial forms and deposits above the PTDAD, as well as basaltic lava flows dated in 47 ± 10 ka and 29 ± 16 ka. On the other hand, the maximum PTDAD should be constrained by the youngest pre-collapse Planchón age, which is 49 ± 14 ka (Klug et al., 2022; Fig. 1). Therefore, it is inferred that the Planchón western collapse occurred approximately at 48 ka BP.

Post-collapse lahar and lavas sequence

In multiple outcrops, the avalanche deposit is covered by up to ca. 15 m thick alluvial deposits, with diffuse bedding formed of grey to purple, coarse-grained breccias composed of subangular clasts. At an elevation of 1,400 m asl, 10 km WNW of the volcano along the Planchón River, a remarkable succession of ancestral lahar deposits is observed, with a total thickness close to 30 m and composed of about five individuals, 3-6 m thick, flow units. The post-collapse lavas that form the terraces in the upper Claro Valley, ca. 13 km downstream from the volcano, show glacial striations on their top and are also covered by subrounded to subangular, poorly sorted reversely graded alluvial beds. More than 15 km downstream, these lahar deposits cover at least two terraces in the Claro Valley, carved out of the PTDAD. According to Naranjo et al. (1999), the most extensive lahar deposits would have originated due to the post-collapse Planchón lava effusion, which due to their high emission rate, would have been capable of melting vast masses of a glacier cap much larger than today. Thus, high-energy lahars were generated by removing large volumes of available moraines. These lahar deposits are found up to 15 km downwards along Claro River towards the west.

Holocene multiphase Valenzuela eruption deposits

These deposits were originated from the most explosive Holocene eruption of the Planchón volcano that occurred approximately 7,000 years BP, given by 14C dates (Naranjo et al., 1999). The overall sequence recognized by Naranjo et al. (1999) as sourced from a single multiphase eruption includes different facies: an initial 30 cm thick tephra-fall phase (12 km SE of Planchón), followed by the eastward emplacement of extended dilute PDC and finally ending with a laminar PDC. Remarkable textural features correspond to the frequent occurrence of soft sediment deformation structures, well developed lamination, palagonization of the ashy matrix and juvenile clasts, and the existence of vesicles in the deposit. The Valenzuela diluted PDC (VPDC) is distributed up to 12 km to the northeast (Valle de Vergara) and 20 km to the southeast (Valle de Valenzuela) and, with an average thickness of 18 m, reaches an estimated total volume of ca. 1.12 km³ (Fig. 1). The uppermost volcanic unit corresponds to the Los Ciegos laminar PDC deposit, which covers an area of ca. 12 km² on the eastern flank of the Planchón volcano, up to the Los Ciegos River. Its volume is estimated to have reached 0.012 km³.

Geochemistry

Both pre-and post-collapse lavas from Planchón correspond to monotonous basalts. Only slight variations are observed between both edifices, mainly related to an increase of olivine and clinopyroxene from 3 up to 5 % in the younger most (Tormey et al., 1989). All the lavas are sub-alkaline basaltic andesites, displaying a narrow SiO₂ content (52.2-54.7 wt%) and medium-K (1.1-1.4 K₂O wt%). These rocks are clearly distinguished from samples of Peteroa-Azufre volcanoes, which show a wider compositional range with high-K andesites and dacites. Despite the bulk composition being relatively homogeneous, pre-collapse lavas are slightly more evolved than the post-collapse ones (with a decrease from 54.4 to 53.4 wt% of SiO₂ in their average composition, respectively). Other compositional changes support this observation; an increase of Mg# from 47.3 to 53.8, an increase of CaO/Al₂O₃, and a decrease in FeOT/MgO average from 0.47 to 1.85 in post-collapse products.

Discussion

Structurally controlled monotonous magma ascent

Lithology and chemistry indicate no significant difference in the composition between the pre-and post-collapse magmas from Planchón volcano. In fact, detailed study of our data shows that the mafic lavas erupted by Planchón before and after the collapse do not reveal any substantial change in the magma composition, pointing to a monotonous production of basalt. Contrarily, the Holocene eruptions include more silicic compositions spanning from basaltic-andesites to the single dacite pumice with high-K signature as well

as trachyandesites erupted in the 2018/19 eruption (Romero et al., 2021) that suggest a different petrological evolution and, possibly, pre-eruptive storage.

The complex structural network in Planchón-Peteroa volcanic complex should be considered a first-order factor in controlling magma ascent and storage. Our results suggest that reverse fault systems, fault conjugation, and cyclic relaxation along the arc induced by recurrent megathrust earthquakes play a major role in magma ascent and evolution (e.g. Naranjo et al., 2018). Hence, the Mw 8.8 February 27th 2010 Maule-type megathrust earthquakes should have occurred several times in the last ca. 50 ky in this area, producing cyclic relaxation along the nearby arc segment. This condition should have facilitated temporary crustal compression-relaxation as an upper crustal bombing system driving a steady supply of dense, mafic magma through these crustal damage zones to feed the activity of Planchón efficiently.

Edifice growth and instability factors

Basaltic and basaltic andesite stratovolcanoes display higher eruption rates and short-lasting evolutions than intermediate-composition volcanoes (i.e., andesitic or dacitic; see Romero et al., 2021 and references therein). This factor has been suggested in previous works (Naranjo et al. 1999) to have contributed, combined with the structural weakening of the basement below the volcano, to the gravitational instability of Planchón volcano.

Based on topographic profiles traced between the eastern and western volcano/basement mapped interface of pre-collapse Planchón we found that Planchón was built on a tilted block dipping ca. 7° to 17° west, limited by the main tectonic structures. Völker et al. (2011) estimated that the volume of the whole PPVC is ca. 163 km³ and the sole volume of Planchón volcano ranges from 30 to 50 km³. Considering the new ages for the pre-collapse Planchón evolution, the minimum eruptive fluxes were between 0.3 and 0.48 km³/ka. Despite a minimum estimate, this is among the higher eruptive rates of arc stratovolcanoes reported by Mixon et al. (2021), ranging from 0.01 to 0.87 km³/ka. This evidence led us to support the hypothesis that rapid growth is the main factor for Planchón volcano instability. After this argument, we do not support that the ice melting as a first order factor contributing edifice instability due to the scarcity of hydrothermally altered material in the avalanche matrix, clasts and blocks, suggesting that the edifice did not undergo extensive hydrothermal weakness before the collapse. This argument rules out the possibility of an external factor, such as a glacial retreat, to have influenced the collapse.

Avalanche mobility

The PTAD has shown exceptional mobility (e.g. Scott et al., 2001) with a coefficient of friction between 0.03 and 0.04. We have obtained a conservative mean emplacement velocity between of 110 m/s, which is higher than other unconfined volcanic debris avalanches from the Andes in their range of 60-80 m/s (e.g., Lastarria; Naranjo & Francis, 1987), but comparable to the Antuco 7.1 ka debris avalanche (102 m/s), which became confined to the Laja River valley (Romero et al., 2022). We suggest that the PTAD behaves as a massive debris flow during deposition, accommodating large blocks in the flow direction, as demonstrated by hummock elongations in the central depression.

Further evolution of the Planchón volcano

Our observations of the pre-collapse components agree with glacial interaction as we identified large hackly-jointed lava blocks within the PTAD, but also the numerous lahars that cover the PTAD to the west (Fig. 1). Extensive ice coverage should have continued during the emplacement of the post-collapse Planchón lavas, as hackly-jointed features also occur in their vertical sections. This implies that the pre-and post-collapse climate conditions and hence the glacial coverage were roughly identical. We propose that at ca. 47 ka, the Claro River valley hosted a glacier that may have reached 0.6-1.0 km width, up to 70 m-thick (contour line of 1.030 m asl) and up to 19 km-long to the WNW of the volcano. Thus, the role of ice retreat is ruled out as an important condition to produce edifice instability.

Post-collapse Planchón was built nested within the collapse amphitheater, with an oval shape of 2.0 x 2.5 km diameter, from which only the northern margin is well preserved. The original collapse scar may have had a horseshoe shape, breached to the west, and limited to the south by a cliff partially cutting the edifice of Azufre volcano (ca. 230 m-high; Fig. 1).

The 7 ka BP activity began with a moderate explosive eruption, producing a complex, multiphase lithic-rich tephra fall deposit. The VPDC deposit was emplaced with high energy to the east, northeast, and southeast. In contrast, on the western Planchón's slope, only massive lahar deposits are distinguished associated with this eruption. The high lithic content within this deposit and its unquestionable PDC character indicates either widespread erosion in the feeding vents or the explosive fragmentation of the eastern avalanche caldera wall during the eruption. In addition, the VPDC deposit shows some key depositional features especially at medial distances (palagonitic glass halos in the juveniles, vesicles trapped in fine ash layers, 'flame'-shaped load structures, and soft-sediment deformation inside the deposits).

Considering the shape of the resulting crater and the VPDC volume (ca. 1.13 km³), its parental eruption should have had characteristics resembling a small caldera-forming event. Thus, we propose that the VPDC can be classified as a lag breccia and dilute PDC deposit of phreatomagmatic subglacial origin.

The last explosive event of this sequence is represented by the Los Ciegos laminar PDC deposit which reached 0.012 km³. Its distribution parameters resemble that of pumice flows. The dark appearance of the deposit surface due to a notorious enrichment of black cauliflower-shaped glassy bombs surrounded by a fine ash matrix are classically interpreted as phreatomagmatic eruptions.

Hazard implications

Considering the factors that contributed to Planchón's instability, more research is encouraged in other volcanoes in the same critical condition, as is the case of Llaima and San José, among the most volumetric and steep-sided Southern Andes composite stratovolcanoes (Naranjo & Moreno, 2005; Völker et al., 2011). Consequently, it is highly recommended to integrate the collapse hazard of Llaima and San José in future studies. To a certain extent, following the recommendations of Cassidy & Mani (2022), coordinated actions should be prioritized, assuming large-scale investments, to mitigate the effects of such scenarios. Other rapidly growing basaltic volcanoes from the SAVZ, such as Antuco or Calbuco, have also experienced catastrophic lateral collapses during the Holocene and have rapidly reconstructed (Mixon et al., 2021; Romero et al., 2021, 2022), increasing their collapse potential.

Keywords: Planchón volcano, Volcanic debris avalanche, Paleoglacial environment, Dilute pyroclastic, density current.

Financing: This work was initially supported by Fondecyt Project N° 1960186 and is a contribution to the Plan Nacional de Geología (PNG) of the Sernageomin, Chile (JAN and JPC). JER was financed through NSFGEONERC-funded project DisEqm (NE/N018575/1), V-PLUS and the Dean's Award of the University of Manchester. Thanks to Fondecyt 1960186 and Sernageomin's PNG (JAN and JPC). JER was financed through NSFGEONERC-funded proj DisEqm (NE/N018575/1), V-PLUS and the Dean's Award of the University of Manchester.

References:

- Cassidy, M. Mani L 2022 Prepare now for big eruptions. *Nature*, 608:469-471.
- Klug J et al. 2022 Intercalibration of the Sernageomin, Chile and WiscAr 40Ar/39Ar laboratories for Quaternary dating. *Quat Geochr*, 72: 101354.
- Mixon E et al. 2021 Calbuco, a monotonous andesitic high-flux volcano in the Southern Andes, Chile. *J Vol Geot Res* 416: 1-22.
- Naranjo J et al. 1999 Geología y Peligros del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Andes Sur (35°15' S) Maule, Chile-Mendoza, Argentina. *Sernageomin, Bol* 52, 55 p.
- Naranjo J; Francis P 1987 High velocity debris avalanche at Lastarria volcano in the north Chilean Andes. *Bul Vol* 49(2): 509–514. Naranjo J; Moreno H 2005 Geología del Volcán Llaima, Región de la Araucanía. *Sernageomin, Cart Geo Chil, Geol Bás* 88, 33 p.
- Naranjo J et al. 2018 Volcanism and tectonism in the southern Central Andes: Tempo, styles, and relationships: *Geosphere* 14(2), 1–16- doi:10.1130/GES01350.1.
- Piquer J et al. 2010 El Cenoico del alto río Teno, Cord Principal, Chile central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. *And Geol* 37(1): 32-53.
- Romero J et al. 2021 Volcanic lateral collapse processes in mafic arc edifices: A review of their driving processes, types and consequences. *Frontiers Earth Sci*, 9: 639825.
- Romero J et al. 2022 Mid-Holocene lateral collapse of Antuco volcano (Chile): debris avalanche deposit features, emplacement dynamics, and impacts. *Landslides* 19: 1321–1338.
- Scott K et al. 2001 Catastrophic Debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: mobility, hazard assessment, and mitigating strategies. *USGS Prof Paper* 1630, 59 p.
- Tormey D et al. 1989 Geologic history of the active Azufre-Planchón-Peteroa volcanic center (35°15'S, S Andes), with implications for the development of compositional gaps. *R Asoc Geo Arg* 44(1-4): 420-430.
- Völker D et al. (2011). Comparative mass balance of volcanic edifices at the southern volcanic zone of the Andes between 33 S and 46 S. *J Vol Geot Res* 205(3-4): 114-129.

Dinámica eruptiva de la erupción pliniana (~10.000 BP) del volcán Llaima

Alejandro Rebolledo Barriga¹, Ángelo Castruccio¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El volcán Llaima corresponde a un volcán compuesto activo ubicado en la Zona Volcánica Sur de los Andes y cuyo registro eruptivo presenta productos de composición predominantemente basáltica a andesítica basáltica. Dentro de su registro se identifican un par de erupciones con productos de composición química más evolucionada, sobresaliendo una de ellas por presentar características típicas de un evento pliniano. Este evento eruptivo fue descrito por Naranjo y Moreno (1991) quien obtuvo volúmenes de 4 km³ y alturas de columna eruptiva de 40 km de altura; y Schindlbeck et al. (2014) que concluyeron en base a criterios petrológicos y geoquímicos que la evolución química del magma emitido en esta erupción fue producto de cristalización fraccionada. Ambos trabajos obtuvieron dataciones C¹⁴ que confirmarían una edad del evento de aproximadamente 10.000 BP. En este trabajo se estudia la dinámica eruptiva asociada a este evento, con base en el estudio de texturas en material piroclástico (vesicularidad y cristalinidad), así como el análisis de depósitos, obtenidos en depósitos de caída y flujos piroclásticos asociados a la erupción.

Resultados preliminares sugieren que el evento pliniano del Llaima posee un volumen estimado de ~ 3,2 km³ (no DRE), de los cuales ~ 2,7 km³ corresponderían al depósito pumíceo que se encuentra sobreyacido por un depósito escoriáceo de composición andesítica con ~0,5 km³. Los depósitos de corrientes de densidad piroclástica se identificaron exclusivamente en el sector E del volcán con un volumen mínimo de 0,2 – 0,5 km³. La altura máxima de la columna eruptiva estimada es entre 20 a 25 km, con velocidades de viento mayores a 30 km/h. Ambos valores obtenidos son menores a los anteriormente reportados para la erupción. A partir del análisis petrológico en ambos casos se pudo corroborar elevados valores de contenido de agua disuelta, así como valores de temperatura y presión que coinciden con los valores previamente obtenidos en ambos eventos.

Simulaciones numéricas de ascenso de magma en niveles superficiales indican radios de conducto > 25 m, profundidad de fragmentación de 1.000 – 2.000 m y velocidades iniciales de ascenso de magma del orden de 10-15 m/s durante la fase pliniana. La elevada velocidad de ascenso habría inhibido la desgasificación del magma, generando un estilo eruptivo exclusivamente explosivo. El trabajo en curso indica un aumento en la proporción escoriácea de los juveniles hacia la etapa final de la erupción, los cuales poseen una menor vesicularidad y consiguiente mayor densidad, lo que podría haber generado el cambio en la dinámica eruptiva, pasando de una columna convectiva a un colapso de ésta.

Keywords: Volcán Llaima, Dinámica eruptiva, Evento pliniano.

Financing: Esta investigación se encuentra financiada por el Proyecto FONDECYT 1211869 “The role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes”, investigación a cargo del Dr. Angelo Castruccio.

References:

- Naranjo, J.; Moreno, H., 1991., Actividad explosiva postglacial en el volcán Llaima, Andes del Sur (38°45'S). Revista Geológica de Chile 18 (1): 69-80.
- Schindlbeck, J.C., Freundt, A. & Kutterolf, S., 2014. Major changes in the post-glacial evolution of magmatic compositions and pre-eruptive conditions of Llaima Volcano, Andean Southern Volcanic Zone, Chile. Bull Volcanol 76, 830. <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0830-x>.

Analysis eruption parameters of eruption Chungará, Parinacota volcano, Arica region, North of Chile

Miyali Riquelme-Garrau¹, Ángelo Castruccio¹, Patricia Larrea¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Parinacota volcano (18°06'S/69°30'W; 6,250 m.a.s.l.) is a compound volcano located on the Central Volcanic Zone (CVZ) of northern Chile on the border with Bolivia and has emitted more than 18 (km³) during the Holocene. This makes it one of the most active volcanoes of the CVZ in that period [4].

In the present work we study one of the most recent explosive units that corresponds to a fall deposit of sub-Plinian type that in this work has been defined as Chungará Unit.

The Chungará unit corresponds to a light brown fall lapilli deposit that extends up to 10 km to the SE of the volcano summit with a maximum recognized thickness of 62 cm. The Chungará unit usually appears 5 to 30 cm below the erosion surface and is covered by fine ash and sandy beds. It presents a slight normal gradation in the upper 20% of the deposit. The deposit is usually composed of a fine to coarse ash matrix (30% vol.). Large fragments (70% vol.) range from coarse lapilli (3-5 cm) to bombs of ~ 15 cm in diameter.

Components of the Chungará unit include Juvenile fragments which are categorized as whitish pumice (0-84 wt.%), brown pumice (2-80 wt.%) and scoria (2-6 wt.%). Additionally, there are banded juveniles (10% vol.) that represent mixing and mingling of pumice and scoria end-members. Lithic fragments include dark (4-15 wt.%), reddish (1-6 wt.%), and white (0.5-4 wt.%) fragments. Isolated crystals (< 1 wt.%) correspond to plagioclase and amphibole with sizes up to 2 mm.

We estimated eruptive parameters such as emitted volume, eruptive column height and eruptive rate. Using isopachs of 10, 20, 40 and 60 cm, a minimum of approximately 0.01 (km³) of erupted volume is estimated according to the Potential Law Model [1]. The height of the eruptive column was estimated in 14 km associated with a velocity of wind of 38 (m/s) according to the method proposed by Carey & Sparks (1986) [3]. The estimation of the eruptive rate is 3600 (m³/s) according to the method proposed by Carey & Bursik (2000) [2].

Our results indicate the potential for explosive eruptions at Parinacota volcano, with preferential winds to the SE, which can affect the international highway that connects Chile and Bolivia.

Keywords: Explosive Eruption, Andes, Analysis eruption parameters of explosive eruption, Northern Chile, Parinacota Volcano

Financing: Financial support was provided by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) FONDECYT Regular Nacional Folio 1211869 granted to A. Castruccio.

References:

- [1] Bonadonna, C., & Houghton, B. F. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67(5), 441–456. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0386-2>.
- [2] Carey, S., & Bursik, M. (2000). Volcanic plumes. *The Encyclopedia of Volcanoes*. En H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes*. Segunda edición. Academic Press, pp. 571-586.
- [3] Carey, S., & Sparks, R. S. J. (1986). Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48(2–3), 109–125. <https://doi.org/10.1007/BF01046546>.
- [4] Clavero et al. (2015). Carta geológica Volcán Parinacota. SERNAGEOMIN.

Evidence of explosive-effusive volcanic eruption transitions from a fossilized magma conduit on the flank of the Nevados de Chillán volcano

Flavia Rojas Guzmán¹, John Browning¹, Hugh Tuffen², José Cembrano¹, Javier Espinosa-Leal¹, Holly Unwin², Thomas Mitchell³, Philip Meredith³, Karin Hofer¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotecnia, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Lancaster University, Lancaster Environment Centre, LA1 4YQ, Lancaster, United Kingdom

(3) University College London, Earth Sciences, Gower Street WC1E 6BT, London, United Kingdom

Volcanic activity is often characterized as either effusive or explosive, but both the 2008 Chaitén eruption and the 2011 Puyehue-Cordón Caulle eruption exhibited periods where both eruption styles occurred simultaneously. The underlying processes that control eruptive styles within a single eruptive event are still poorly understood. As such, more insight is needed to determine factors that govern both a particular style of eruptive activity and the changes between them within the same event. Data to aid this understanding is necessary for accurately determining the potential risks related to future eruptions at any volcano.

We investigate the question of how effusive and explosive eruptive phases interact and evolve during the ascent of magma through a single conduit. To provide insight into these processes, we present new data from a fossilized conduit on the south-west flank of the Nevados de Chillán volcano - within an active and hazardous Andean volcanic complex. The 2.5 m-wide shallow conduit records textural evidence indicative of diverse transitions in magma behaviour and with a similar NE strike orientation to other dykes observed within the complex. We combine field and laboratory methods focused on the integration of field-scale and micro-scale observations, using three-dimensional outcrop reconstruction from photogrammetry, optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) for textural analysis, SEM-EDX for semi-quantitative compositional analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) to measure dissolved H₂O in glassy samples, and helium pycnometry and image analysis to quantify porosity and particle size distribution.

The conduit presents nine distinct zones which were defined based on their textures and morphologies. Zone 1 corresponds to the pyroclastic domain, Zone 2 to the contact area between this domain and the densified central lava, Zones 3 to 8 are different textural areas of the central conduit and Zone 9 is the eastern contact with the breccia. In Zone 2 we identify a 0.4 m-thick area of sub-vertically intercalated bands of yellow-coloured pyroclastic material with darker densified lava. The intercalated bands form undulating but linear structures with individual band thicknesses ranging from millimeters to decimetres. Devitrification textures, high glass content margins and alteration zones are present in the inter-band contacts. Spot major element data from SEM-EDX analysis shows little chemical composition difference within and between the different bands, indicating a common magmatic origin. High-magnification SEM images indicate the occurrence of micron-scale rounded and globule-like glassy clasts that are welded onto the crystal surfaces and are indicative of sintering and densification of fragmental magmatic material.

Porosity measurements indicate that the pyroclastic-rich domain has a porosity of more than one order of magnitude higher than the densified lava domain. High-resolution porosity estimations from optical analysis indicate transitional domains between the pyroclastic and dense domains. We infer that the contrasting characteristics of each zone relate to the densification of an initially crystal-rich, granular material through particle coalescence and void space reduction into a dense and compacted material. By reducing the porosity, and through inference permeability, it is expected that the stiffness increases, which inhibits the deformation of the dense material. FTIR results show a decrease in dissolved magmatic water from the outer margin towards the centre of the conduit, from 0.19 wt% in the pyroclastic domain to 0.10 wt% in the central dense lava. The low water contents suggest near-atmospheric pressure conditions applied, meaning that the conduit was at or within tens of metres of the surface.

The conduit formed during an initial explosive stage driven by magma fragmentation, followed by various stages of magma sintering and welding of the fragmented particles to form multiple densified bands towards a central dense plug-like column. Sintering and densification continued inwards from the conduit walls until dense lava-like magma sealed the conduit. This continued to deform plastically as it was pushed by material from deeper in the dyke, generating foliated and platy textures within the central part of the conduit. The explosive part of the eruption would likely have been substantially shorter than the effusive part, however, our observations are limited to essentially the same exposure depth and so we cannot say with certainty how fragmented the lower parts of the dyke are. Our findings are useful for constraining models of conduit evolution as determined from observations of eruptions and at other well-exposed conduits elsewhere.

Keywords: eruptive transitions, sintering, volcanic conduit, Nevados de Chillán.

Financing: This work was financially supported by the project FONDECYT 1210591 (Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico).

New analysis of the InSAR data for vertical deformation associated with the April 2015 Calbuco volcanic eruption and implications for understanding the eruptive dynamic

Francisca Sánchez Valle¹, Mahesh Shrivastava¹⁻², Simón Orrego Astudillo³, José Gutiérrez Álvarez¹, Iojhan Baltazar Zamora¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotecnia, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Lancaster University, Lancaster Environment Centre, LA1 4YQ, Lancaster, United Kingdom

(3) University College London, Earth Sciences, Gower Street WC1E 6BT, London, United Kingdom

The Calbuco volcano (41°20'S, 72°39'W) located in the Southern Andes of Chile, occupies the third place in the national ranking of specific volcanic risk (www.sernageomin.cl). This andesitic stratovolcano of the Southern Volcanic Zone presents a wide record of historical activity, with a predominance of subplinian eruptions (Selles & Moreno, 2011). Its last eruptive cycle, in April 2015, is one of the most studied Chilean volcanic events due to its high explosivity (rated VEI 4; Romero et al., 2016), as well as its rapid and unexpected beginning. The precursory signals consisted of a slight increase in seismicity since February 2015, and a seismic swarm that began ~ 3 hours before the first eruption (Valderrama et al., 2015). Previous Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) analyses spanning the 2015 eruption at Calbuco volcano have not recognized clear signals of precursory ground deformation (Delgado et al., 2017). However, it is relevant to note that the application of InSAR data in high-altitude Andean stratovolcanoes entails a series of difficulties (Pritchard & Simons, 2004). This is mainly due to the combination of certain factors that decrease the accuracy of measurements, such as changes in the dispersive properties of the soil, the capture geometry of the SAR images, variations in atmospheric properties, and various noise sources that can obscure patterns associated with surface displacement (Albino et al., 2020). Here, we report the InSAR results from Sentinel-1A TOPS images, from October 2014 to March 2016. We assess the volcanic deformation from two different InSAR approaches: i) individual interferograms and ii) time-series using the Small Baseline Subset method (SBAS). The interferograms used in the SBAS analysis were improved using atmospheric and orbital corrections to increase the accuracy of the measurements. The deformation signals that we detect indicate ~ 130 mm of co-eruptive subsidence. In addition, precursory ground uplift was identified on the southern flank of the volcano at a rate of ~ 50 mm/year, and slight inflation during the post-eruption period. Our analysis suggests that factors such as the presence of snow, vegetation and high slope of the volcano generate geometric decorrelation in the area, while the marked atmospheric variations cause a temporal decorrelation in the time series. Reducing these effects by applying combined corrections allowed us to improve the accuracy of the results by 30 – 40 %. Determining the source of ground displacements at Calbuco volcano in contrast to seismic data improves our understanding of its magmatic reservoirs and, on a larger scale, may contribute to comprehending how large eruptions can be triggered with few precursors.

Keywords: volcanic deformation, InSAR, Calbuco volcano, magma storage, large eruptions.

Financing: This study has been sponsored by the Millennium Institute on Volcanic Risk Research - Ckelar Volcanoes.

Acknowledgments: To Susana Layana, María Pía Rodríguez and Jaime Araya for sharing their knowledge and advise. And, to Álvaro Aravena by his revisions.

References:

- Albino, F., Biggs, J., Yu, C., & Li, Z. (2020). Automated Methods for Detecting Volcanic Deformation Using Sentinel-1 InSAR Time Series Illustrated by the 2017–2018 Unrest at Agung, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2). <https://doi.org/10.1029/2019JB017908>
- Delgado, F., Pritchard, M. E., Ebmeier, S., González, P., & Lara, L. (2017). Recent unrest (2002–2015) imaged by space geodesy at the highest risk Chilean volcanoes: Villarrica, Llaima, and Calbuco (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 270–288. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.020>
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the southern Andes. *Geophysical Research Letters*, 31(15), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL020545>
- Romero, J. E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Polacci, M., Burton, M., & Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 317(April 2015), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027>
- Selles, D., & Moreno, H. (2011). Geología del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. En *Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica* (Número March). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Valderrama O., Franco L., Gil-Cruz F. (2015). Erupción intempestiva del volcán Calbuco, abril 2015. *Actas XIV Congreso Geológico Chileno*, 91–93. https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14905_v3_pp_91_93.pdf.

Influence of preexisting faults on the structure of collapse calderas from Discrete Element Method models

Matías Villarroel Lastra¹, John Browning¹⁻², Martin Schöpfer³, Carlos Marquardt¹⁻², Pamela Jara⁴

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de ingeniería, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

(3) University of Vienna, Department for Geodynamics and Sedimentology, Vienna, Austria

(4) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

Collapse calderas occur when the roof of the magma chamber collapses downwards during a large eruption, resulting from either overpressure or the partial evacuation of magma within the chamber. Various theoretical, field, and modeling studies have suggested that collapse calderas are shaped by a combination of outward-dipping reverse faults and inward-dipping normal faults. However, the role of preexisting crustal faults in shaping a caldera or modifying the conditions of fault nucleation is less clear. This is important since many calderas form in areas of intense crustal faulting. This study utilizes two-dimensional Distinct Element Method (DEM) models to investigate the influence of preexisting structures on collapse caldera evolution and resulting geometric style. To do so we model a crustal segment composed of a shallow magma chamber at different depths, which progressively reduces in volume, so as to mimic magma withdrawal. Results are compared between cases simulating a homogeneous crust and models simulating a crust with preexisting crustal faults. The faults are spaced at 1, 5 and 10 km intervals and they are modelled simply as low friction zones – i.e. where the fault friction coefficient is lower than the surrounding intact rock. Our preliminary results are benchmarked against other well characterized analogue, analytical and DEM model results, deriving similar morphometric evolution and end-member collapse styles. Regarding the novel aspects of our models, numerical results show that the preexisting faults do change both the geometry and style of collapse indicating an important role during caldera formation. By testing different fault spacing and properties we are able to determine parametric ranges over which faults do and do not contribute to the overall collapse geometry. These results will be useful for reconstructing collapse caldera processes from exhumed cases and for understanding the conditions necessary for future collapse at potential caldera volcanoes.

Keywords: collapse calderas, pre existing faults, collapse evolution, fault property, distinct element method.

Bridging the Gap between Mechanical Models of Caldera Ring-Fault Nucleation and the Transcrustal Magma System Model

Matías Villarroel Lastra¹, John Browning¹⁻², Carlos Marquardt¹⁻², Matías Clunes¹, Gabriela Zañartu¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotécnica, Ingeniería, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

The formation of collapse calderas poses a significant geohazard due to their association with large-volume eruptions. Additionally, calderas and their underlying structures are often linked to high-potential geothermal systems and valuable mineral deposits. The formation of a new caldera necessitates the initiation of circumferential ring-faults that connect an underlying magma chamber to the Earth's surface. Subsequently, the roof of the magma chamber collapses inward as a result of either overpressure or underpressure within the chamber. However, recent observations suggest that many calderas may form above complex transcrustal magma systems, comprising several individual or interconnected magma chambers situated at various depths within the Earth's crust. While several attempts have been made to define the mechanical conditions leading to ring-fault nucleation in calderas, these models often assume the presence of a single shallow magma chamber or a combination of a shallow magma chamber and doming of a deep-seated reservoir. Consequently, there have been no endeavors thus far to reconcile the mechanical conditions necessary for ring-fault nucleation and potential caldera formation with the inferred geometries and arrangements of complex transcrustal magma systems. In this study, we address this issue by utilizing Finite Element Methods (FEM) to reconcile the known mechanical conditions for ring-fault nucleation in calderas with the model of transcrustal magma systems by simulating multiple arrangements of magma pockets. Our results indicate that relatively small lateral or vertical differences in the positioning of magma pockets impede the required stress conditions for ring-fault nucleation and propagation in calderas. Out of the various tested arrangements of shallow magma chambers, only a few were found to create the necessary conditions for successful formation of caldera ring-faults, supporting the rarity of caldera formation in nature. Although these findings do not rule out the role of transcrustal magma system dynamics in caldera formation, they suggest that, in most cases, individual magma batches must combine to form a single source prior to ring-fault nucleation.

Keywords: Caldera collapse, ring-fault, transcrustal magma systems, collapse conditions, finite element method.

The triggering of sub-Plinian and Plinian eruptions: insights from 30 years of InSAR data in the Andean Southern Volcanic Zone (1991-2023)

Francisco Delgado¹, Pablo Leon¹, Sofia Parra¹, Diego Lobos², Juan Carlos Baez³

(1) Universidad de Chile, Geología
 (2) Cornell University, Earth and Atmospheric Sciences
 (3) Universidad de Chile, Centro Sismológico Nacional

At the most fundamental level eruptions are triggered by a complex interplay of processes produced by magma injection into reservoirs located beneath volcanoes (Tait et al., 1989; Caricchi et al., 2021). The transport and storage of these magma batches can result in ground deformation that can be measured on the Earth's surface using ground and space-borne geodetic methods such as GPS, tilt meters, and InSAR. In this contribution we analyse multi-platform InSAR time series from the ERS-1/2, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Sentinel-1 and ALOS-2 missions spanning a sequence of four VEI 4-5 eruptions in the Southern Volcanic Zone (SVZ) of the Andes. These eruptions include Hudson 1991 (basaltic, andesitic), Chaitén 2008-2009 (rhyolitic), Cordón Caulle 2011-2012 (rhyolitic) and Calbuco 2015 (andesitic). These four eruptions make the SVZ the arc with the largest erupted mass between 1980 and 2019 (Galetto et al., 2023). Only the Klyuchevskoy, Bezymianny, Tolbachik and Shiveluch cluster in Kamchatka (Pacific Northeast, Russia) display an erupted mass of similar magnitude during the same time span. The erupted mass in the SVZ and Kamchatka is similar to that erupted by the Hawaii hot spot, making them the most productive arcs on Earth in the last decades.

The InSAR compilation shows that both Hudson and Cordón Caulle have uplifted for more than one decade after their last Plinian eruptions, at rates of ~3 cm/yr and 12 cm/yr respectively. The uplift was likely triggered by the large pressure gradient that these events produce between a shallow source (5-10 km depth) and deeper lower crust / mantle sources. This results in at least 0.31 and 0.2 km³ of basaltic magmas injected during 1993-2021 for Hudson and 2012-2023 for Cordón Caulle respectively. Only at Cordón Caulle we observe a clear cycle of pre-eruptive uplift, co-eruptive subsidence and post-eruptive uplift due to magma injection and extraction, as predicted by fluid-solid mechanics models (Pinel et al., 2010) and geodetic observations in hot spot and continental rift basaltic volcanoes (Kilauea, Kilauea, Grímsvötn, Sierra Negra, Dabbahu). On the other hand, Calbuco and Chaitén only show deformation during the eruptions, with neither detectable precursors nor post eruptive uplift triggered by reservoir repressurisation. There are multiple explanations for the lack of precursory deformation involving intrusions of small magnitude that are detectable by petrology only, but not by geodesy, and a highly compressible gas phase in the reservoirs that might mute any reservoir pressurisation, among others. The geodetic data shows no evidence for mass transfer in a trans crustal magmatic system.

On a global scale the geodetic observations of the SVZ Plinian and sub-Plinian eruptions are unique. A compilation of several VEI 4-5 eruptions spanning 1991-2023 show that only the 2008 Okmok eruption in the Aleutians and the 2020 Taal eruption in the Philippines display a pattern of cyclic ground deformation similar to that of Cordón Caulle. Other events of similar magnitude in the Northern and Central Andes, Caribbean, Aleutians, Kamchatka, Kuriles, Sunda, and Papua New Guinea arcs lack enough data and/or the volcanoes where they occurred do not sustain high interferometric coherence to yield a positive and/or negative detection of ground deformation with InSAR. Indeed, more than 50% of the VEI 4-5 eruptions in the past decades occurred in tropical (Sunda, Papua New Guinea) and polar volcanoes (Aleutians, Kamchatka). Therefore, the lack of an overall trend in the global compilation calls for the acquisition of denser time series that might be able to detect deformation of smaller amplitude (< 1 cm) in the days before an eruption by new or soon to be launched L-band SAR missions like SAOCOM-1A/B, ALOS-4, NISAR and TanDEM-L.

Keywords: InSAR, rhyolitic eruption, basaltic eruption, volcano geodesy, triggering

Financing: FONDECYT de iniciación 11220513Beca de doctorado nacional ANID

Acknowledgments: We also thank NASA, ESA, CNES, JAXA, CSA, ASI, DLR for developing and providing the InSAR processing software and several tens of thousands of SAR images

Revisión sistemática del régimen de esfuerzo a lo largo del arco volcánico sur de los Andes y su relación con procesos volcano-tectónicos (33°-46°)

Nicolás Pérez Estay¹, Gerd Sielfeld²⁻³, Javiera Ruz-Ginouves⁴⁻⁵, Pamela Pérez-Flores⁶, Tomás Roquer⁷, José Cembrano¹⁻⁵

(1) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) - Universidad de Chile, Santiago, Chile.

(2) Cirrus SpA, Chile.

(3) School of Environment, University of Auckland, Auckland, New Zealand

(4) Geology Department, University of Otago, Dunedin, New Zealand

(5) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

(6) Consultoría e Investigación Geológico Ambiental Ltda., Huasco, Chile.

(7) Departamento de Ingeniería de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

El estado de esfuerzo que domina la deformación en la corteza superior es clave para entender tanto la circulación de magma a través de fracturas, como las perturbaciones mecánicas registradas previas, durante y después de las erupciones volcánicas. Por esta razón, es primordial estudiar el régimen de esfuerzos que domina cada volcán. En este trabajo realizamos una extensa recopilación de información sobre la deformación frágil registrada a lo largo de toda la Zona Volcánica Sur de los Andes (ZVS), y caracterizamos el estado de esfuerzo en los volcanes. Esto permite comprender los principales procesos volcanotectónicos que ocurren en la zona. Encontramos tres tipos estados de esfuerzo que pueden explicar la mayoría de la información recopilada, y la presencia de cada tipo puede tener importantes implicancias para el monitoreo de erupciones y desarrollo de proyectos geotérmicos.

Se compilaron datos de la deformación de largo plazo (geología estructural) y corto plazo (sismología) en la cadena volcánica completa. Estos consisten en datos de deslizamiento mesoscópico en fallas exhumadas y mecanismos focales de sismos corticales. En total se utilizaron 20 referencias, y se analizaron 16 volcanes, lo que representa el ~23% de los volcanes de la ZVS. Con los datos recopilados se calculó el estado de esfuerzo (i.e., orientaciones de ejes de esfuerzo principales $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ y la razón de esfuerzos Φ) mediante el método de inversión múltiple (MIM, Yamaji, 2000).

Los resultados indican que la mayoría de los estados de esfuerzo pueden clasificarse en 3 tipos: (i) Tipo-A: σ_1 y σ_3 sub-horizontales, con azimuth NE para σ_1 , y NW para σ_3 ; (ii) Tipo-B: σ_1 con una orientación sub-vertical, y σ_3 sub-horizontal con un azimuth indefinido. (iii) Tipo-C: σ_1 sub-horizontal con un azimuth NW (perpendicular al Tipo-A), y con σ_3 de azimuth/buzamiento variable.

En base a las discusiones, las principales conclusiones de este estudio son:

- La deformación de largo y corto plazo son similares, pero no iguales. Las observaciones de largo plazo sugieren que los regímenes de esfuerzos en volcanes son complejos y pueden presentar más de un tipo de estado de esfuerzo.
- La conclusión más importante es que existen tres tipos de esfuerzos que pueden explicar la mayoría de los procesos de la zona. Los cuales se pueden resumir en: (i) Tipo-A relacionado con el stress regional tectónico del campo lejano, controlado por el vector de convergencia de placas; (ii) Tipo-B que puede estar relacionado con el stress que generan los procesos intrusivos y extrusivos de los volcanes; y (iii) Tipo-C que puede estar relacionado con el paso de fluidos a través de fracturas.
- Existe una correlación estadística entre los volcanes con erupciones históricas y la presencia del estado de esfuerzos Tipo-C. Esto no implica causalidad, ni demuestra una relación física, pero invita a investigar en detalle esta correlación y el posible uso de esta señal de esfuerzos como predictor de erupciones.
- Los volcanes clasificados como Tipo-B pueden representar un atractivo para la industria geotérmica, dada las siguientes características generales: (i) presencia probable de un emplazamiento magmático en la corteza frágil, y además (ii) presentan condiciones favorables para la generación de fracturas extensionales, promoviendo la permeabilidad y circulación de fluidos calientes.
- Estos tres tipos de estados de esfuerzo han sido observados en otros arcos volcánicos compresionales y de rumbo, como Sunda, Aleutians-Alaska, y Northeast Honshu. Esto sugiere que estos tres tipos de esfuerzos están relacionados con los procesos volcanotectónicos de arcos compresionales y de rumbo, más allá del ZVS.

Keywords: Zona Volcánica Sur, volcanismo, tectónica, geotermia, esfuerzos principales

Acknowledgments: Esta contribución ha sido parcialmente financiada por CEGA (ACE 210005).

References:

- Yamaji, A. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. J Struct Geol 22, 441–452 (2000)

Fábrica magnética de los plutones La Obra-Cerro Blanco (Chile central, 33.5°S): ¿Evidencia del emplazamiento de un reservorio magmático subvolcánico?

María Alejandra Covarrubias Prado¹, Ítalo Payacán Payacán¹, Nicolas Rodríguez Oria¹, Fernando Poblete Gomez²

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, ingeniería y tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Ciencias físicas y matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Estudiar la estructura interna de los plutones a partir de la **fábrica magnética** y variaciones mineralógicas, nos puede sugerir los procesos magmáticos que ocurrieron en la construcción y posterior diferenciación composicional de un **reservorio magmático** emplazado en la corteza. Esta técnica permite estudiar la deformación generada por procesos propios de los reservorios y su dinámica convectiva, así como también el efecto de los procesos tectónicos sobre el emplazamiento los magmas que dan lugar a los cuerpos plutónicos.

En esta contribución se presentan antecedentes petrográficos, geoquímicos y de la fábrica magnética de los plutones La Obra y Cerro Blanco, emplazados en el margen occidental de la Cordillera Principal de Chile Central. Con edades entre los 20 y 22 Ma (U-Pb en circón). Estos han sido reportados como intrusiones graníticas a dioríticas emplazadas a unos 4 km de profundidad, intruyendo las rocas volcánicas de la Formación Abanico (Eoceno-Oligoceno).

La estructura interna del plutón La Obra presenta una zonación en el eje vertical con niveles que varían desde cuarzdiorita hasta granito. Sin embargo, el plutón Cerro Blanco parece tener una estructura interna bastante homogénea, de composición granítica con alta concentración de diques leucograníticos.

Los resultados de anisotropía de la susceptibilidad magnética muestran que existen variaciones en la fábrica y propiedades magnéticas a lo largo y ancho del plutón. La fábrica está controlada por titanomagnetita multi-dominio, cuyo contenido se relaciona directamente con los valores de susceptibilidad magnética promedio (K_{bulk}), la cual varía entre $2,90 \times 10^{-3}$ y $5,58 \times 10^{-2}$ SI. Las facies menos diferenciadas del sistema La Obra-Cerro Blanco (cuarzo-diorita) presentan los más altos valores de susceptibilidad magnética ($>5,0 \times 10^{-2}$ SI), mientras que para el dominio mayormente diferenciado (granito), se registraron los valores más bajos de susceptibilidad magnética promedio ($<3,0 \times 10^{-3}$ SI).

En términos espaciales, la fábrica magnética muestra lineaciones horizontales con dirección al N, al igual que la elongación del intrusivo, mientras que los planos de foliación son principalmente verticales, excepto en los niveles superiores cercanos al techo, donde se tienen foliaciones ligeramente inclinadas a horizontales. Sin embargo, este patrón se ve interrumpido al desplazarse hacia el sur en dirección al plutón Cerro Blanco, donde se obtienen fábricas magnéticas con lineaciones inclinadas en dirección NE, apuntando en dirección a la zona más alta del plutón y alcanzando incluso disposiciones verticales en las zonas superiores.

Bajo microscopio óptico se aprecia que los cristales que conforman las rocas del sistema La Obra-Cerro Blanco no presentan evidencias de deformación *subsólido* pervasiva, sugiriendo que la fábrica magnética se adquirió en un estado parcialmente fundido, sustentado además por el desacople de la estructura interna del plutón con respecto a la roca de caja. Si bien se aprecian algunos cristales con deformación plástica, esta se acota a bandas kink intracrystalinas y acotadas a unas centenas de μm , sin alterar la disposición de la titanomagnetita. A partir de estas evidencias, proponemos que la fábrica magnética se registró en el avance del frente de cristalización del reservorio. Nosotros interpretamos que la lineación magnética registra la dirección de flujo durante la inyección de múltiples pulsos en la dirección longitudinal de los intrusivos. Se reconoce que el **emplazamiento** del plutón es posterior a la deformación regional, la cual generó zonas de debilidad que favorecieron el emplazamiento y **construcción** del reservorio de magma.

Se plantea que las lineaciones inclinadas y subverticales registradas en el plutón Cerro Blanco indicarían que este constituyó una zona de ascenso de magma hacia niveles superiores de la corteza. Aquí proponemos que el plutón Cerro Blanco habría sido capaz de alimentar volcanismo silíceo registrado en rocas piroclásticas silíceas, previamente reportadas en las inmediaciones del área de estudio, dentro de las sucesiones volcánicas de la Formación Farellones. En este sentido, las evidencias parecen especular que el plutón Cerro Blanco y las rocas volcánicas de edad similar representan un par volcánico-plutónico, cuyo estudio podría ayudar a entregar nuevos antecedentes acerca de una discusión vigente acerca de la conexión entre ambos ambientes.

Palabras Clave: Fábrica magnética, anisotropía de susceptibilidad magnética (ams), reservorio magmático, emplazamiento

Financiamiento: FONDECYT N° 1180577, The Fund for Publication Developments project [PEP I-2019071] granted by Universidad Mayor - Vicerrectoría de Investigación.

Agradecimientos: Muchísimas gracias a Sarah Leray y al equipo de CONAF del parque río Clarillo, por todo el apoyo en la campaña de terreno.

Referencias:

- Garibaldi, N., Tikoff, B., Schaen, A. J., & Singer, B. S. 2018. Interpreting granitic fabrics in terms of rhyolitic melt segregation, accumulation, and escape via tectonic filter pressing in the Huemul Pluton, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10), 8548-8567. KURTZ, A. C., KAY, S. M.
- Charrier, R., & Farrar, E., 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, central Chile (34-35°S). *Revista Geológica de Chile*, 24(1), 75-90.
- Payacán, I., Gutiérrez, F., Gelman, S. E., Bachmann, O., Parada, M. Á. 2014. Comparing magnetic and magmatic fabrics to constrain the magma flow record in La Gloria pluton, central Chile. *Journal of Structural Geology*, 69, 32-46.
- Payacán, I. (2021). Emplacement and compositional evolution of shallow magma reservoirs in contractional arcs: The case of the San Gabriel Plutón in the Andes Central Chile (33.8°S). Doctor. Tesis, University of Chile. RODRÍGUEZ, N. 2022. Emplazamiento del batolito La Obra y su relación con la deformación externa, Chile central (33°35'S - 33°47'S): Inferencias desde el estudio de la fábrica magmática y microtexturas. Memoria de título, Universidad Mayor, Departamento de Geología.

Rol de la deformación tectónica coaxial en la segregación de riolitas en la Zona Volcánica Sur: determinación y modelamiento numérico de fábricas magmáticas del complejo plutónico Risco Bayo – Huemul

Nicolas Garibaldi¹, Basil Tikoff², Joshua Davis³, Allen Schaen⁴

(1) Universidad Nacional Andrés Bello, Geología, Ingeniería, República 239, Santiago, Chile

(2) University of Wisconsin-Madison, Geoscience, Geoscience, 1215 W Dayton St, Madison, WI, EE.UU.

(3) Carleton College, Mathematics and Statistics, 509 Goodsell Circle, Northfield, MN, EE. UU.

(4) University of Arizona, Geoscience, 1040 E. 4th Street, Tucson, AZ, EE. UU.

En zonas de convergencia oblicua de placas, el plutonismo y volcanismo corticales típicamente se expresan en alargadas y angostas zonas transcurrentes que resultan de la localización del componente no coaxial (cizalle simple) de la deformación. Sin embargo, desconocemos el rol del componente coaxial (cizalle puro) en la deformación y segregación magmática dentro de reservorios silíceos, someros, y con alto contenido de cristales ("mush"). Para responder esta pregunta, investigamos fábricas magmáticas en el complejo plutónico Risco Bayo – Huemul (RBH), en la Zona Volcánica Sur de Los Andes (latitud 36° S). Las fábricas se documentaron mediante observaciones de terreno, análisis microestructural, Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS), y Tomografía Computarizada de Rayos X (XRCT). Los análisis revelaron alineaciones de feldespatos, biotitas, anfíbolos, y magnetita, definiendo foliaciones de rumbo NNW subverticales y lineaciones variables a contenidas en el plano de foliación. Estas observaciones son consistentes con la dirección de acortamiento tectónico interpretado en el área. Para comprender el rol de la deformación tectónica en la génesis de las fábricas, realizamos modelos numéricos de rotación de cuerpo rígido de los cristales determinados mediante XRCT. Para los modelos utilizamos tres condiciones cinemáticas de borde: transpresión (dominada por cizalle puro y simple), cizalle inverso, y pérdida de volumen anisotrópica. Los modelos que mejor reproducen las fábricas son los de transpresión dominada por cizalle puro, y pérdida de volumen anisotrópica. Estos resultados sugieren que, a lo largo de la Zona Volcánica Sur, la deformación coaxial es registrada en reservorios silíceos someros de alta cristalinidad. Trabajos previos reportan evidencia de fábricas y geoquímica de que el complejo plutónico RBH experimentó segregación de riolita parcialmente asistida por acortamiento tectónico. Combinando nuestros resultados con estos estudios, proponemos que, a lo largo de este arco magmático, durante el Mioceno, el componente coaxial de la deformación tectónica interactúa con reservorios silíceos someros para asistir la segregación subvolcánica de riolitas.

Palabras Clave: Fábricas Magmáticas, Tectónica y magmatismo andino, Modelamiento, Vínculo entre deformación tectónica y magmatismo.

Financiamiento: National Science Foundation (EAR-1650232), University of Wisconsin-Madison Geoscience Department, y Jay C. Nania Fellowship.

Generación de espacio y zonación reológica de un reservorio de magma félsico: Inferencias a partir de la fábrica magnética del Plutón San Gabriel (33.5°S)

Jorge Godoy Cepeda¹, Ítalo Payacán Payacán¹, Joaquín Vargas¹

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

El estudio de cuerpos plutónicos emplazados en la corteza superior ofrece la oportunidad de comprender los procesos imperantes dentro de los reservorios magmáticos. El paradigma de reservorios de magma zonados composicional y reológicamente, con zonas de magma móvil pobre en cristales y zonas de magma rígido, conlleva una evolución fluidodinámica compleja marcada por la interacción entre nuevas inyecciones de magma, desarrollo de celdas convectivas y retrabajo de magmas cristalizados en etapas tempranas. El estudio de las fábricas magmáticas permite reconocer la deformación que tiene lugar en las cámaras de magma, utilizando herramientas tales como la anisotropía de la susceptibilidad magnética (AMS). La comparación de los patrones de fábrica internos de los intrusivos con los patrones de fábrica registrados en la roca hospedante ha permitido establecer la interacción entre la dinámica del magma y la deformación tectónica durante la evolución de los reservorios magmáticos para comprender, por ejemplo, los mecanismos de generación de espacio.

En la presente contribución se muestran los resultados de los análisis de la fábrica magnética obtenidos mediante AMS en el plutón San Gabriel (PSG): un intrusivo Mioceno emplazado en la corteza superior, con 40 km² de exposición areal y 800 m de altura máxima y ubicado en la Cordillera Principal de Chile central (~33.5°S). Estudios previos muestran que este se compone por distintos dominios: (1) un dominio principal, zonado concéntricamente, compuesto por cuarzo-monzonitas a cuarzo-monzodioritas; (2) un dominio basal de monzogranitos inequigranulares y (3) un dominio medio de cuarzo-dioritas de grano grueso. Esta zonación composicional se ha interpretado como consecuencia de procesos de diferenciación mediante segregación de fundidos residuales silíceos (monzogranitos) desde un mush cristalino (cuarzo-monzonitas), dejando algunos residuos ricos en cristales (cuarzo-dioritas). Este proceso ocurrió en el nivel de emplazamiento, y dio lugar a un reservorio de magma zonado reológicamente. Entonces, en este estudio se explora el registro de las variaciones reológicas dentro del reservorio de magma que dio lugar al PSG y su relación con las estructuras de la roca de caja.

Se analizaron 25 sitios distribuidos a lo largo y ancho del plutón. En general, las rocas del PSG tienen susceptibilidad magnética promedio en un rango de [0,031-0,096 SI], lo que sugiere que las propiedades magnéticas están controladas por titanomagnetita (tal como indican análisis de óxidos de Fe en SEM-EDS). En general, los tensores de anisotropía presentan geometrías típicamente oblatas con un rango de valores de foliación (F) de 1,003-1,072 y de anisotropía (Pj) de 1,026-1,090. Las fábricas presentes en el PSG presentan foliaciones que son principalmente verticales en el límite occidental, oriental y sur del plutón con tendencias de rumbo hacia el NW, consistentes con la orientación del intrusivo. En cambio, en el límite norte los planos de foliación muestran rumbos NE, con manteos inclinados hacia el N, describiendo un patrón concéntrico siguiendo los bordes del plutón. Por otro lado, algunos sitios provenientes del dominio monzogranítico, ubicados en la base del PSG, muestran foliaciones horizontales, difiriendo de la fábrica del dominio cuarzomonzonítico.

A partir de los valores relativamente bajos de anisotropía y la ausencia de microestructuras de deformación de estado sólido, nosotros interpretamos que la fábrica magnética del PSG fue adquirida en un estado parcialmente fundido (magmático) producto de flujos convectivos propios de la dinámica interna del reservorio. Además, el dominio monzogranítico habría sido un nivel de magma pobre en cristales con alta capacidad convectiva, el cual intruyó el magma altamente cristalino del dominio cuarzo-monzonítico, cuyo contacto representó una zona de contraste reológico entre magmas. Por otro lado, al comparar la fábrica magnética del PSG con la fábrica magnética de la roca de caja en sus cercanías, se aprecia que la fábrica del plutón está desacoplada con la estructura de la roca de caja. La foliación magnética de la roca de caja es subparalela a la estratificación, la cual está dispuesta perpendicular al contacto con el PSG y su foliación magnética. Este desacople sugiere que el magma se habría hecho espacio desplazando la roca de caja hacia abajo, probablemente con un comportamiento frágil. Si bien, existe evidencia de deformación dúctil en zonas estrechas concentradas en el techo, y siempre es superpuesta por deformación frágil. Nosotros proponemos que el desplazamiento pudiera haber sido producto de mecanismos de stoping (tal como sugieren los numerosos xenolitos preservados en los bordes del plutón) o mediante subsidencia del piso del intrusivo.

Palabras Claves: Cámara magmática, Fábrica, Mush, Strain, Plutón San Gabriel

Hydrogeochemical processes and solute origin in arid volcanic closed basins: A multi-isotope approach in the Salar del Huasco and Lagunilla basins, northern Chile

Fernanda Álvarez Amado¹⁻², Daniel Matte-Estrada¹, Camila Paz Poblete González¹, Daniele Tardani³, Linda Godfrey⁴

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Water Research Center for Agriculture and Mining - CRHIAM. FONDAP ANID Center., Victoria 1295, Concepción, Chile

(3) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

(4) Department of Earth and Planetary Sciences, Rutgers University, Piscataway, NJ 08504, USA

The Salar del Huasco and Lagunilla basins, located in the Precordillera and Western Cordillera of the Andes, are enclosed basins with limited precipitation, creating evaporitic environments suitable for the formation of saline lakes. These basins exhibit similar climatic and geological conditions to the northern Chilean Andes, where various hydrogeochemical processes, including geothermal water influence, water-rock interactions, and ancient brine effects, have been identified to explain the surface water and groundwater composition. However, these processes can exhibit local and regional variations. This study aims to investigate the origin of solutes in natural waters by establishing links between geochemical and isotopic composition in order to elucidate the hydrogeochemical processes occurring in these arid volcanic closed basins.

To achieve this goal, we analyzed geochemical and isotopic data for lithium (Li), boron (B), and strontium (Sr) in natural waters, as well as trace elements, Li isotopes ($\delta^7\text{Li}$), and Sr isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in sediments and volcanic rocks. The measured $\delta^7\text{Li}$ values in the waters ranged from +5.5‰ to +36.1‰, similar to those observed in the surrounding rocks (+5.5‰ to +10.5‰). In contrast, the $\delta^7\text{Li}$ values in sediments exhibited a wider range, including negative isotopic ratios (-6.6‰ to +19.7‰). The $\delta^{11}\text{B}$ values in the waters varied from +1.1‰ to +13.3‰, while the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values ranged from 0.7060 to 0.7066 in the waters and from 0.7061 to 0.7079 in the volcanic rocks.

The isotopic signature of B can be influenced by various factors. These factors include the dissolution of evaporites, which releases ^{10}B into the water without affecting the Li system, and the significant impact of evaporation, which leads to the fractionation of ^{11}B in the vapor phase. Unlike B, Li is not a volatile element, so the fractionation resulting from the precipitation or adsorption of B is counterbalanced by evaporite dissolution and evaporation. Additionally, the pH of the sample, which closely aligns with the equilibrium constant of B species, suggests that these species are dissolved in similar proportions in the water, indicating that pH is not the primary cause for the stability of $\delta^{11}\text{B}$.

The $\delta^7\text{Li}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values provide evidence for the significant role of water-rock interaction as the primary hydrogeochemical process. The isotopic values for lithium and boron suggest the formation of secondary minerals resulting from the weathering of volcanic rocks, indicating the sorption of these metals in secondary phases such as clays and hydroxides. The concentration of lithium and boron in the waters increases with salinity, consistent with evapoconcentration in the basins. Isotopic mixing diagrams further demonstrate the involvement of geothermal waters, sedimentary brines, evaporites, and diluted water in the composition of the waters.

Overall, the multi-isotope approach used in this study indicates that solute concentration in the studied area is primarily influenced by evaporation, water mixing, and the precipitation of secondary minerals, particularly in salt lakes. The origin of solutes in the catchment area is predominantly derived from volcanic and volcanoclastic sources.

Keywords: stable isotopes, lithium isotopes, hydrogeochemistry, arid volcanic basins.

Financing: Financial support for this study was provided by ANID-FONDECYT grant 11160325 to Fernanda Álvarez Amado.

Acknowledgments: We acknowledge Centro Fondap CRHIAM, ANID/FONDAP/15130015. We acknowledge C. Quintana for her help with fieldwork logistics.

Precipitation rates in El Tatio geothermal field: in-situ experiments as an approach to understand trace element partitioning

Valeria Bustamante¹⁻², Alida Perez-Fodich¹⁻², Carolina Munoz-Saez³, Louis A. Derry⁴

(1) University of Chile, Department of Geology, Santiago, Chile

(2) Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA), University of Chile., Santiago, Chile

(3) University of Nevada, Nevada Bureau of Mines and Geology, Reno NV, USA

(4) Cornell University, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Ithaca NY, USA

Silica sinters are opal deposits formed by precipitation of silica-rich hydrothermal fluids during the discharge and cooling of underlying geothermal systems, and thus, these deposits preserve information about the fluid through textural, chemical, and biological evidence [1]. El Tatio geothermal field, located at 4,200 m.a.s.l. in the Central Andes in Chile, hosts more than 200 hydrothermal manifestations [1,2], including geysers and perpetual spouters where fossil and modern sinter silica deposits are ubiquitous. Silica precipitation rates at El Tatio appear to be controlled by environmental conditions driving fast water-cooling and high evaporation [3,4]. The precipitation dynamics can control the incorporation of trace elements, such as Ge or Al, substituting Si in the opal structure. Previous studies [5] have shown that Ge incorporation rates can be orders of magnitude slower than silicon precipitation rates. The variety of silica precipitation environments available in El Tatio and the high silica precipitation rates make this an ideal location to investigate how precipitation dynamics influence trace element partitioning into opal.

In this study, we deployed in-situ fluid evaporation and opal precipitation experiments, and we also sampled hydrothermal fluids and fossil sinters to study the partitioning of Al and Ge in opal across a range of environmental (T° , fluid composition) and hydrodynamic conditions in El Tatio. We selected two sites, the perpetual spouter named Ckoitchi (Ck) and Vega Rinconada (VR) geyser, with fluid compositions of 225 and 315 mg/L of silica respectively. For Ck were selected 5 points and for VR 4 points, TDS values are around 15,000 mg/L for VR and close to 10,000 mg/L for Ck. The main anion present is chloride, with values between 218-233 mmol/L and 129-131 mmol/L for VR and Ck each. Thus, in terms of fluid composition, Ckoitchi is more diluted than Vega Rinconada.

During the evaporation experiments, dissolved silica decreased over time, suggesting silica precipitation resulting in an increase of Ge/Si ratios from 71.8 to 81.4 $\mu\text{mol/mol}$ due to the removal of dissolved silica. The results from the precipitation experiments indicate that silica precipitation rates range between 0.44 – 5.6 kg/year/ m^2 . Silica precipitation rates increase with fluid cooling at a distance from the vent, since the cooling of the fluid causes the supersaturation of amorphous silica, hence favoring precipitation [4]. When precipitation rates are high Al_2O_3 is up to 0.13 wt. %, compared to low precipitation rate where Al_2O_3 is 2.75 wt. % of the precipitated opal. This translates into Al/Si ratios decreasing with increasing precipitation rates and therefore low temperatures. We expect Ge to follow the same behavior as Al considering preliminary Ge/Si results from precipitation experiments and previous studies on Ge [5].

The field results evidence the slow incorporation of trace elements into amorphous silica as the silica precipitation rate increases, which is consistent with previous numerical simulations in laboratory experiments [5]. Our results emphasize the role of the fluid temperature and precipitation rates as drivers of trace element partitioning in sinter deposits. In conclusion, this experimental approach can be a significant tool in the study of water-rock interactions in geothermal deposits.

Keywords: Silica, Hydrothermal fluids, Precipitation, Trace element.

Financing: The project is financed by Fondecyt de Iniciación 11200656, U-Inicia 006/20, ANID-FONDAP 15090013 (CEGA), CONADI and Programa de Pueblos Indígenas from Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Acknowledgments: This research was conducted in the lands inhabited by the Lickanantay native communities of Caspana and Toconce to which we express our gratitude.

References:

- [1] Cortecchi, G. et al. (2005). *Geochemical Journal*, 39(6), 547-571.
- [2] Glennon, J.A. & Pfaff, R. (2003). *GOSA Trans*, 8, 31-78.
- [3] Nicolau, C. et al. (2014). *JVGR* 282, 60-76.
- [4] Munoz-Saez, C. et al. (2023). *ESS*, doi:10.1029/2022EA002645.
- [5] Fernández, N. et al. (2021). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 297, 158-178.

Estudio Geoquímico de las Aguas Termales del Volcán Villarrica y sus Posibles Alteraciones Previas a una Crisis Volcánica

Daniel Ignacio Martínez Olguín¹, Daniel Basualto Alarcón²

(1) Universidad Austral de Chile, Geología, Ciencias, Independencia 630, Valdivia, Chile

(2) Universidad de La Frontera, Dirección de Investigación y Postgrado, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile

Las aguas termales de la Zona Volcánica Sur (ZVS) de Chile, entre los 36° y los 41°S, se han estudiado a nivel regional por varios autores [2; 11; 9; 8] utilizando relaciones de elementos mayores, elementos trazas de metales alcalinos e isótopos para caracterizar su geoquímica, mecanismos de formación y explorar la influencia de los controles estructurales regionales en la composición de los fluidos [11; 8]. Las variaciones en el contenido de volátiles (por ejemplo, S, Sb, B, Cl, Bi, Zn, Mo, Br, Cd, Ag, Cu y Pb), la cantidad de elementos lixiviados relacionados con la roca (por ejemplo, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, REEs, y U), y las variaciones en la concentración de Cl y S por sí solas, se postulan como parámetros clave para monitorizar los sistemas volcánico-hidrotermales activos [5].

La ZVS alberga numerosas fuentes termales (25-85°C), relacionadas con el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (LOFS) y Fallas Transversales Andinas (ATFs), sugiriendo la factibilidad de la explotación geotérmica de baja a alta entalpía. Sin embargo, la comprensión local de los procesos y factores que controlan la circulación de aguas subterráneas permanecen indefinidos, lo cual limita su explotación [2]. Para analizar la geoquímica de los fluidos, es necesario evaluar la naturaleza del vínculo entre el tipo de estrés vinculado con la generación, disposición y distribución de fracturas asociadas con sistemas de fallas activas, el control que juegan estas con el ascenso y circulación de fluidos magmáticos, la asimilación de la roca caja y los procesos de mezcla que se desarrollan en la corteza superior. Estos factores afectan a la composición de los fluidos hidrotermales descargados a lo largo de estructuras principales y secundarias de una falla de rumbo intra-arco de escala regional [9].

En el sur de Chile, la actividad hidrotermal bajo estratovolcanes activos se debe a una combinación de altos gradientes geotérmicos como consecuencia de la actividad magmática, la permeabilidad de rocas hospedantes y una abundante recarga de agua meteórica [7]. El Volcán Villarrica, considerado uno de los volcanes más activos en Latinoamérica, posee diversas fuentes termales en sus alrededores, las cuales han sido estudiadas mediante la identificación de los procesos que afectan la composición de las aguas las cuales pueden explicar su origen y naturaleza [1]. Si bien existen otros estudios sobre su caracterización geoquímica [3; 6], es muy poca la información respecto a potenciales cambios que pudiera sufrir ante una crisis volcánica (cambios de alerta amarilla-naranja-roja), lo cual se podría interpretar como señal precursora de una erupción.

Los datos disponibles sobre erupciones históricas indican que casi siempre van precedidas y acompañadas de "agitación volcánica", manifestada por cambios físicos y/o químicos en el estado del volcán y/o su sistema hidrotermal asociado [10]. Se ha realizado un análisis espaciotemporal de los parámetros físicos del Volcán Villarrica, entre 2014-2020, para establecer periodos de comportamiento inusual de la actividad volcánica [4], en los cuales se identificaron 2 periodos como nivel base: (1) Nivel Base 1, enero-mitad de julio 2014, (2) Nivel Base 2, diciembre 2017-julio 2019; y, 4 periodos, donde la actividad del volcán aumentó de manera inusual: (1) Actividad Inusual 1, fines de julio 2014-febrero 2015, (2) Erupción, marzo-abril de 2015, (3) Actividad Inusual 2, mayo 2015-noviembre 2017, (4) Actividad Inusual 3, agosto 2019-diciembre 2020.

El objetivo de este trabajo es realizar un monitoreo de las fuentes termales y lacustres relacionadas al Volcán Villarrica, como las Termas Geométricas, Rincón y Palguín, y los lagos Calafquén y Villarrica, buscando anomalías en las concentraciones de elementos asociados con volátiles (S, Sb, B, Cl, Bi, Zn, Mo, Br, Cd, Ag, Cu y Pb), esto con el objeto de lograr identificar posibles intrusiones de fluidos magmáticos al sistema hidrotermal.

Trabajo en desarrollo durante 2do y 3er trimestre 2023.

Palabras Clave: Hidrogeoquímica, Fuentes Termales, Interacción Agua-Roca, LOFS, Volcán Villarrica.

Agradecimientos: Contacto: daniel.martinez02@alumnos.uach.cl - daniel.basualto@ufrontera.cl.

Referencias:

- [1] Bucarey Parra, C. (2020). Origin of hot springs near Villarrica volcano. Tesis Mg en Rec Nat. U Cat de Temuco.
- [2] Daniele et al. (2020). Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: Insight from the Liquiñe thermal springs. *Journal of Geochemical Exploration*, 218, 106611.
- [3] Held et al. (2018). Geochemical characterization of the geothermal system at Villarrica volcano, Southern Chile; Part 1. *Geothermics*, 74, 226-239.
- [4] Hermosilla, K. (2023). Análisis de la actividad sísmica del Volcán Villarrica: propuesta para establecer líneas de base para el monitoreo volcánico en los andes del sur. Tesis Geología. U Cat de Temuco.
- [5] Inostroza et al. (2022). Monitoring Hydrothermal Activity Using Major and Trace Elements in Low-Temperature Fumarolic Condensates: The Case of La Soufrière de Guadeloupe Volcano. *Geosciences* 2022, 12, 267.
- [6] Nitschke et al. (2018). Geochemical characterization of the Villarrica geothermal system, Southern Chile, part II. *Geothermics*, 74, 217-225.
- [7] Ray et al. (2009). The effects of volatile recycling, degassing and crustal contamination on the helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the Southern Volcanic Zone of Chile. *Chemical Geology*, 266(1-2), 38-49.
- [8] Sánchez et al. (2013). Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe-Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review*, 55(11), 1384-1400.
- [9] Tardani et al. (2016). Exploring the structural controls on helium, nitrogen, and carbon isotope signatures in hydrothermal fluids along an intra-arc fault system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184, 193-211.
- [10] Tilling, R. I. (2008). The critical role of volcano monitoring in risk reduction. *Advances in Geosciences*, 14, 3-11.
- [11] Wragge et al. (2017). Geochemistry of thermal waters in the Southern Volcanic Zone, Chile—Implications for structural controls on geothermal fluid composition. *Chemical Geology*, 466, 545-561.

Environmental and Hydrogeochemical Controls of Spicular Geyserite in Opaline Hot Spring Deposits

Carolina Muñoz Saez¹⁻², Alida Perez-Fodich³, Jian Gong⁴, Mark van Zuilen⁵

(1) University of Nevada Reno, Department of Geological Sciences and Engineering, College of Science, 1664 N Virginia St, Reno, NV 89557, Reno Nevada, United States

(2) University of Nevada Reno, Nevada Bureau of Mines and Geology, College of Science, 1664 N Virginia St, Reno, NV 89557, Reno Nevada, United States

(3) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) University of Wyoming, School of Computing, 1000 E. University Ave. Bureau of Mines Building, Room 231 Dept. 3395 Laramie, WY 82071, Laramie, United States

(5) Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer, CNRS-UMR6538 Laboratoire Geo-Océan, Plouzané, France

Siliceous spicules are micro-laminated geyserite sinter deposits, similar in appearance to micro-stromatolites, found around high temperature hot-springs and geysers, and associated with intermittent splashes of water. El Tatio hydrothermal field in Atacama Desert, Chile, represents a modern analogue for habitable environments on early Earth and Mars. Improving the understanding of the field conditions of formation of these structures can give important insights of critical parameters involved in prebiotic environments and early life. New data sets around two geysers from the El Tatio provide information about the environmental, chemical and hydrological conditions forming spicules. Observations indicate that small spicules (<5 mm diameter) dominate in the near vent areas, whereas larger spicules (>5 mm diameter) forming complex columnar structures are predominant in the distal vent (>0.3 m distance from the vent). We found that a combination of hydrodynamics, eruption periodicity, and environmental conditions modulate the temperature and cooling patterns around vents of geysers. During geyser eruptions, the temperature of water reaching the ground decreases with the distance from the vent. Cooling is stronger during the evenings, due to the daily pattern of strong winds and cold air temperature. Rapid water-cooling drives supersaturation of amorphous silica, and therefore precipitation rates increase significantly with distance from the vent. Cooling also controls changes in the bacterial communities as well, from thin filaments <1 µm diameter predominating closer to the vent, to 1–2 µm diameter filaments in the distal vent. Changes in the silica precipitation rate and biota may control the growth of spicules and the transition to columns. Estimated precipitation rates of silica provide a first approximation of the longevity of these structures and the timing for the formation of internal laminations. Microlamination will form in year time-scales closer to the vent, and weeks farther from the vent.

Keywords: sinter, geyserite, spicule, siliceous, hot spring.

Financing: This research was funded by NSF Grant EAR 2143533 awarded to CMS, ANID-Fondecyt 11200656 and U-Inicia UI-006/20 awarded to APF, and the ANID-FONDAP 15090013 (Andean Geothermal Center of Excellence, CEGA). MVZ acknowledges support from the European Research Council (ERC), under the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program (Grant agreement no. 646894).

Acknowledgments: We all would like to thank Valeria Bustamante for her assistance in the field; to Joel Desormeau, John Grimsich, and Michael Manga for their help in SEM analysis; and to Seth Saltiel for the editions.

References:

- Munoz-Saez, C., Gong, J., Perez-Fodich, A. and van Zuilen, M.A., 2023. Environmental and hydrogeochemical controls of spicular geyserite in opaline hot spring deposits. *Earth and Space Science*, 10(3), p.e2022EA002645.

Facies volcánicas de magnetitas del Complejo Volcánico El Lago

José Antonio Naranjo¹, Fernando Henríquez², Jan Olov Nyström³, Howard Richard Naslund⁴

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile
(2) Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago de Chile, Casilla 10233, Santiago, Chile
(3) Swedish Museum of Natural History, Box 50007, SE-104 05 Stockholm, Sweden
(4) SUNY, Binghamton, Department of Geological Sciences, NY 13902, NY, USA

Introducción

El Complejo Volcánico El Lago (CVEL), desde la primera publicación (Park, 1961) ha sido uno de los sitios geológicos más debatidos y con gran cantidad de referencias en la literatura geológica. Este interés es tanto de carácter científico como del origen de los yacimientos de hierro del tipo Kirurana y su relación con los yacimientos IOCG. Hasta ahora existen tres claras hipótesis para su origen: ortomagmática por inmiscibilidad de líquidos (Henríquez y Martín, 1978); reemplazo hidrotermal (Larson y Oreskes, 1993); magmática -hidrotermal por flotación de magnetita en suspensión (Knipping et al. 2015).

El interés científico radica en establecer las condiciones de formación de los cuerpos de magnetita con claras características volcánicas, los cuales en este trabajo los consideraremos como rocas de magnetita o magnetititas. El propósito de este trabajo es documentar detalladamente las características de las facies volcánicas de magnetitita. Los resultados son el trabajo de terreno desarrollado por años de investigación, con observaciones, muestreo y mapeo de casi 9.000 m de testigos de sondajes en todos los cuerpos de magnetititas ejecutados por CMP, compañía dueña del yacimiento. Además, los estudios de terreno se han complementado con estudios microscópicos, análisis químicos, DRX, etc.

Sobre la base de dataciones de lavas andesíticas del CVEL por los métodos Ar/Ar (Naranjo et al., 2010) y *fission track* (Maksaev et al., 1988), se obtuvieron valores en el intervalo Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior.

Geología del CVEL

El CVEL se emplazó en el eje del arco volcánico de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (24.5° a 27°S) y se ubica aproximadamente 30 km al sur de la caldera La Pacana (Gardeweg and Ramírez, 1987) y a 20 km al NE de la recientemente descubierta caldera Talar (Romero et al., 2022).

CVEL se ubica en la intersección casi ortogonal de dos mega-lineamientos Andinos: la falla-lineamiento Barrancas Blancas-Sierra de Lina y la falla o lineamiento Olacapato-El Toro, con la llamada Falla El Lago. La primera corresponde una rama nororiental extendida de orientación SW-NE del Sistema de Fallas Barrancas Blancas-Volcán Puntas Negras (Villa et al., 2019). Se extiende por un total de 325 km desde la Cordillera de Domeyko hasta 67 km al NE del CVEL, en la Sierra de Lina (Seggiaro et al. 2007). Por otra parte, la falla o lineamiento Olacapato-El Toro corresponde a una falla de rumbo noroeste que produce dislocamientos y desplazamientos sinistres (Ramelow et al., 2006) y que se extiende por 360 km.

Finalmente, la falla El Lago corresponde a una falla norte-sur de ca. 9 km de largo, inmediatamente al norte del CVEL. Esta estructura produce un descenso de 330 m del bloque oriental del basamento del volcán Puntas Negras y habría propiciado el colapso parcial del flanco oriental del volcán El Hueso. Hacia el norte están cubiertas por lavas del Volcán Puntas Negras.

El CVEL incluye al domo Pico Lago (5.325 m s.n.m.), único centro de emisión de las lavas andesíticas. Asociados a los flancos del Volcán El Lago y a cotas entre 4.600 y 5.100 m s.n.m., se reconocen siete volcanes subsidiarios magnetíticos: Rodados Negros (RN), San Vicente Bajo (SVB), San Vicente Alto (SVA), Pasos Blancos (PB), Vicuña (V), Lago Norte (LN) y Lago Sur (LS) (ver mapa Fig. 1).

Facies de magnetititas de los volcanes subsidiarios

Lavas Rodados Negros

- Afloran bloques macizos de magnetita/hematita centimétricos-métricos con bolsones decimétricos de vesículas de 1-2 cm y amígdalas de (apatita?, plagioclasa, sanidina, tridimita baja, cuarzo, dióxido, rutilo, natroalunita, alunita, calcita y escapolita?).
- En caras planas, presentan bandas macizas de hasta 15 cm, con estructuras columnares subparalelas de magnetita, de 1 a 15 cm de largo, orientadas sub-perpendicularmente a los espacios interbandas.
- El bandeamiento exhibe disposición subvertical en profundidad. También hay bloques con desarrollo de laminación milimétrica a centimétrica, y oquedades interbandas de entrapamiento gaseoso <30 cm de diámetro, con cristalización milimétrica a centimétrica de magnetita.

Lavas San Vicente Bajo

- 'Coulées' en flujos macizos sucesivos de hasta 10 m de espesor de lava bloques de magnetitita (0,5 a 2 m de diámetro), con diaclasamiento vertical.
- Pipas de desgasificación con cristales de magnetita >1 cm al interior y en oquedades, y abundantes vesículas centimétricas e irregulares, en la cima.
- Inyecciones de magnetititas en andesita alterada hacia el borde de SVB.

Piroclásticos San Vicente Bajo

- Flujos de oleadas piroclásticas densas grises, matriz pulverulenta gris de grano fino (cristales de magnetita) y bloques angulosos (magnetita y hematita).
- Estructuras de estratificación cruzada y festoneadas centimétricas a decimétricas en la matriz. Además, depósitos de hematita pulverulenta que cuece a la andesita arcillizada y forma una aureola, a partir de verdaderos apófisis de magnetita.
- Localmente, la matriz de flujos piroclásticos se presenta profusamente invadida por vetas y vetillas de arcillas, color amarillo intenso alrededor de grupos de bloques y bombas de hematita/magnetita. Se observan PDC grano fino con bloques angulosos y precipitados verdosos y pátina de hematita y niveles menores de magnetita.
- Borde noreste del domo exógeno SVB se muestra desgasificación en pipas de magnetita y hematita, en forma de cenizas. Se observan clastos accesorios de andesita semidigeridos con bordes de diópsido y cristales finos. Sectores con cristalización de apatita(?) en pipas. También se observan, hacia afuera, pipas de apatita-epidota-magnetita-hematita.

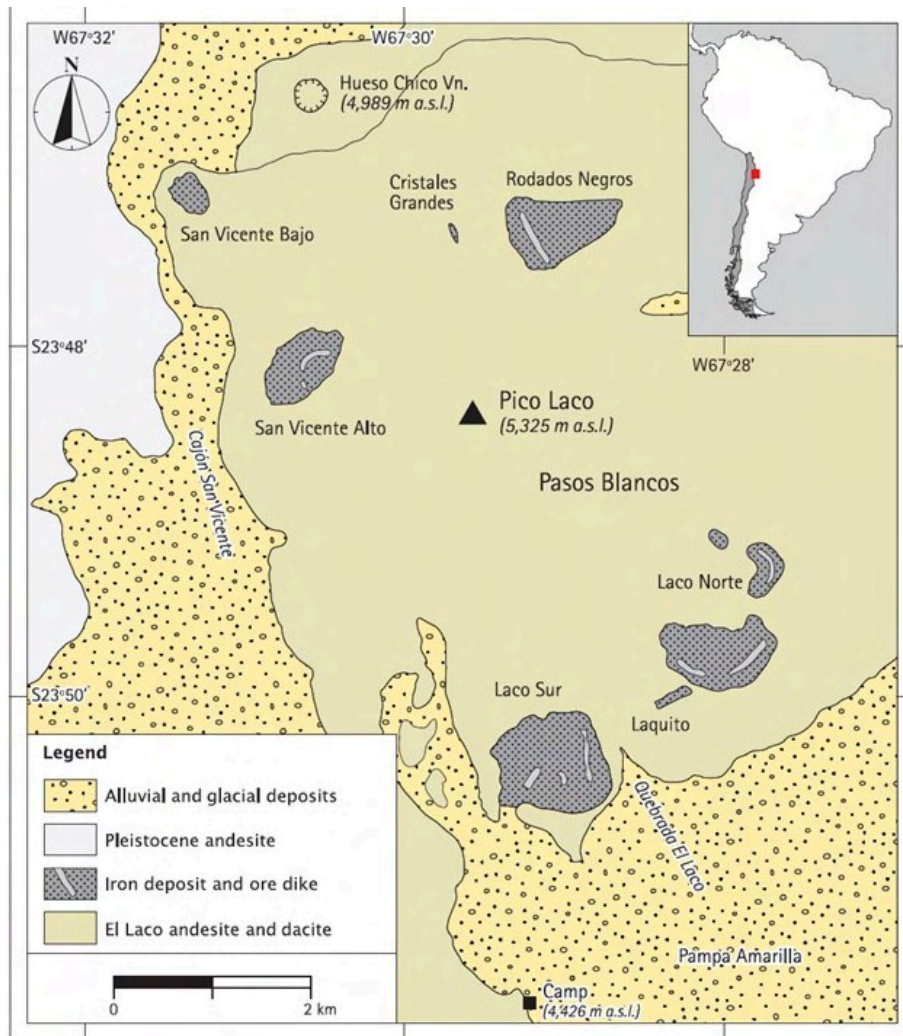


Fig. 1. Mapa geológico del Complejo Volcánico El Lago que muestra la ubicación de los volcanes subsidiarios, así como otras ocurrencias de magnetitas. Las Lavas y Piroclásticos Vicuña se ubican en la parte septentrional de Lago Norte (modificado de Naranjo et al., 2010).

Lavas San Vicente Alto

- Domo y fisura anular de lavas de magnetita.
- Lava bloques (<2 m) de magnetita, maciza, escasas vesículas centimétricas a decimétricas y bombas de magnetita con forma de huso (Henríquez y Nyström, 1998) y corteza tipo 'aa' y precipitados de cloruro férrico ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Piroclásticos San Vicente Alto

- Lapilli grueso de magnetita y diversas texturas y bombas métricas subesféricas y bloques de superficie áspera "ganchuda" semejantes a la superficie 'aa' de bombas silicatadas.
- Bombas métricas con cortezas de tipo coliflor con pátina de sublimados de fosfatos iridiscentes, así como rojizas como consecuencia de oxidación parcial a hematita en la superficie. Al interior exhiben color gris metálico con cristales milimétricos de magnetita y, además, de color amarillo de una cubierta o precipitados de cloruro férrico o limonita.

- Internamente, las bombas muestran un agregado poroso de cristales de magnetita con canales irregulares que irradian desde la parte interna, consistente con la desgasificación como la bomba descrita por Henríquez y Nyström (1998). En bloques y bombas también se distinguen superficies ásperas del tipo 'slicken-side' producidos por el roce superficial de lavas en estructura de armadillo milimétricas a centimétricas, semejantes a lava andesíticas. También existen bombas decimétricas con estructuras internas con formas de volutas arriñonadas.

Piroclásticos Pasos Blancos

- Pdc gris, de 1.5 m de espesor expuesto, clasto soportado de 'pillow breccias' imbricadas, con bloques alargados de 5 a 35 cm, con gradación normal-inversa. Consisten en una mezcla íntima de andesita con magnetita.
- Ca. 40 m al NE, este depósito varía a una acumulación piroclástica de caída, gris clara de "pseudo-hyaloclastics lapilli" (fino a grueso) en bandas con y gradaciones internas, y espesor decreciente al NE entre 80 y 40 cm.

Lavas Vicuña

- Lavas de magnetita de bloques de forma irregular, color pardo rojizo-gris oscuro, dimensiones decimétricas a métricas, de magnetita/hematita, muy vesicular.
- En la parte alta se distinguen al menos siete afloramientos de emisiones de lava vinculados a flujos piroclásticos.
- Lavas de magnetita (hmt/mgt) con intenso desarrollo de fracturamiento/diacleasamiento con facies de bloques con fracturamiento tipo puzzle y diacleasamiento vertical, posiblemente producidos como planos de enfriamiento/desgasificación(?).

Piroclásticos Vicuña

- Depósito de bloques y cenizas de magnetita que alcanza 160 m de extensión en descenso hacia el ESE y ancho semejante; espesor expuesto de 2,5 m, bajo depósitos de flujo de detritos. Depósito clasto-soportado, con bloques de hierro <0,5 m de diámetro, imbricación al SE. Matriz gris medio con lentes pardo-rojizos, subordinada con bolsones submétricos de ceniza y lapilli fino a grueso de magnetita/hematita, en bandas con estratificación cruzada y volutas, con deformación tipo sedimentos húmedos.
- Desde frentes de lava de magnetita y sobre ellas, comúnmente, se presentan facies discretas de pdc de magnetita: depósitos de bloques y cenizas y oleadas piroclásticas, en estrecha relación con depósitos de flujos de escombros turbulentos. Exhiben espesores decimétricos a 1,5-2 m y afloran por algunos metros a lo largo de los cortes de caminos. Abarcan una superficie total de 0,25 km² y fueron emplazados en abrupto descenso hacia el NE, sobre la ladera sur de la quebrada.
- Flujos pardo-rojizos, clasto-soportados, bloques de 10 a 50 cm con escasa matriz de ceniza oxidada. En pocos metros, varían a depósitos de oleadas piroclásticas de hierro, color gris y pardo rojizas que también les cubren. Localmente, las oleadas piroclásticas se emplazaron sobre lavas con desarrollo de permafrost poligonal en taludes y regolito, en la ladera sur de la quebrada Vicuña.
- Internamente, las oleadas decimétricas presentan estratificación cruzada, con estructuras de dunas y antidunas, con burbujas deleznales en las cenizas de magnetita de la matriz, así como rasgos de deformación del tipo sedimentos húmedos y 'downsags' producidos por bombas de hasta 20 cm. En las facies grises, principalmente cenizas de hematita especular con algo de magnetita y barniz de sublimado de fosfatos. Se observan lentes de color pardo-rojizo en los depósitos de bloques y cenizas, así como posibles lapilli accreccionarios y minerales de arcillas verdes y amarillas en bandas y cubiertas de lapilli.
- Inmediatamente bajo el talud frontal de coladas de lava andesítica se observan diversos afloramientos lenticulares de hasta 20 m de largo, de flujos piroclásticos de cenizas fuertemente oxidados, emitidos desde afloramientos de lavas hematitizadas. Están caracterizados por una superficie ondulante y con desarrollo de notables aureolas decimétricas de oxidación que afectan al talud frontal de las lavas andesíticas suprayacentes.

Lavas Laco Norte

- Filón de superficie muy irregular con cerrillos o bloques de magnetitas de hasta 6 m de diámetro y vesículas centimétricas. En extremo oriental, aflora espina de lava de magnetita de 10 m de altura y 13 m de diámetro, sin confinamiento. Internamente, la espina muestra intenso diacleasamiento vertical de 20-30 cm de ancho.
- Centro emisión de lava de magnetita al norte del filón con superficie irregular y diversas salientes, entre otras, una estructura cómica de 6 m diámetro y 2,5 m de alto, con superficie lisa, intensa y radialmente fracturada. Internamente, muestra fracturamiento multidireccional. También se observan filones menores de 70 cm sobresalientes, de hasta 2 m, sin confinamiento.

Piroclásticos Laco Norte

- Un boquete de 2,5 m de diámetro, a los pies de montículos de lavas de magnetita del sector W del filón de Laco Norte exhibe depósitos de flujos de bloques y cenizas de magnetita, con espesores expuestos de 1,6 m. Abajo presenta cierta gradación normal de piroclastos (clasto soportado de bombas a lapilli grueso) muy irregulares, angulosos y aplastados de óxido de hierro. Hacia arriba varía a un flujo matriz soportado de lapilli fino a cenizas de magnetita.
- Ca. 100 m al NW límite occidental del filón, depósito de bloques y cenizas de color gris medio, principalmente clasto soportado, < 1 m expuesto, constituido por lapilli a bombas de óxido de hierro, parcialmente vesiculares (<80 cm) con cierto grado de imbricación que indica un transporte desde el SE. Se observan, vetillas de precipitados arcillosos, así como bolsones de ceniza de hierro y bloques accesorios de hasta 60 cm de andesita arcillizada de color rosáceo, incorporados durante el flujo sobre las rocas alteradas subyacentes.
- Aproximadamente 100 m al NW del extremo oriental del filón Laco Norte, aflora un depósito de bloques y cenizas de color gris oscuro y de hasta 1,6 m de espesor. Incluye bloques de magnetita macizos y escasamente vesiculares, de hasta 60 cm de diámetro, en una matriz de cenizas y lapilli.
- El depósito de bloques y cenizas cubierto y desgarrado por flujo de detritos suprayacente de color pardo rojizo anaranjado de 0,2 a 1,8 m.

Lavas Laco Sur

- Extremo NW de Laco Sur, lava de magnetita de ca. 2 m de alto, ca. 5.600 m², rodeada y cubierta por depósitos de pdc de magnetita. Podría ser la colada de lava de magnetita más larga aflorante en el CVEL.
- Ladera sur del extremo occidental de la cima, corte de 7 m exhibe sectores hematizados muy fracturados de lavas de bloques (<5 m) de magnetita.
- En el extremo NE, un filón de <9 m de ancho y 5 a 6 m de alto expuesto, orientación NE y 100 m de largo; desde su extremo E, continúa por 60 m en dirección N. Presentan paredes escarpadas y descubiertas, sin contención. En la cima se exponen espigas de <3 m de magnetitas muy vesiculares con intenso fracturamiento irregular. Sobre las caras del escarpe se observan parches decimétricos de 3 cm de espesor, de superficie suave, con estructuras de tipo estalafitos, semejantes a aquéllos ubicados al interior de las paredes de túneles de lava basáltica. En la base del filón se expone una sección vertical de lava de magnetita, que muestra pipas de escapes de gas.
- Sobre ladera sur, 20 m al W del rajo, se exponen 2 m de una lava de bloques (<1 m) de magnetita gris medio a oscuro, con vesículas centimétricas.
- En el rajo se expone un cuerpo de lava maciza de magnetita con fracturamiento vertical con espaciado sinuoso de 1,5 m (<3 m). Presenta 'stopping' con diversos mega-bloques <20 m de andesitas y andesitas brechosas alteradas con presencia de diópsido, de tonos verdosos y bordes de reacción (cocidos).

Piroclásticos Laco Sur

- Flujos de bloques y cenizas de magnetita <250 m de largo, emplazados hacia el S desde el sector alto W de Laco Sur; facies proximales <5 m de espesor, con bloques de magnetita oxidadas, de 0,1 m a 1,5 m, algunos con iridiscencia por sublimación de fosfatos-sulfato de hierro; matriz hematítica (ceniza fina a gruesa) color gris a rojizo que presenta conspicuas burbujas de 2 a 5 mm. Facies distales <0,75 m de espesor y corresponden a pdc de bloques y cenizas con bandeamiento y oleadas con deformación en volutas de cenizas oxidadas con burbujas, gris verdoso, con deformación plástica, las que, en menos de 5 m, engranan con lóbulos de facies más gruesas. Asimismo se observan polvo de magnetita con patina iridiscente de fosfato.
- En una trinchera de rumbo SSE ubicada 75 m al SW del rajo, se observan 3-4 unidades de flujo (pulsos) de depósitos de bloques y cenizas de magnetita (total ca. 4-5 m). Corresponden a flujos de bloques densos de magnetita fragmentada en una matriz de ceniza, con estructuras reomórficas con lentes sindeposicionales sigmoidales por 'slumping' con dirección al S y forman estructuras de capas lenticulares que se acuñan en <10 m. Muestran colores gris medio y gris pardo, con niveles centimétricos de diadoquita.
- En el rajo se observan estructuras planas, subhorizontales a levemente inclinadas, que se asemejan planos de estratificación. Las estructuras empinadas son tubos de escape de gas y fracturas pos-deposicionales. Estas facies cineríticas finas también incluyen diminutas esférulas y bombas <70 cm con iridiscencia (Nyström et al., 2016). Algunos son bandeados y contorneados, con capas tipo "hojas de cebolla", semejante a estructura de desgasificación rápida en bombas andesíticas.

Discusión y conclusiones

Las evidencias descritas señalan morfologías, texturas y disposición espacial de eventos volcánicos que caracterizan la presencia de magnetitas en los volcanes subsidiarios en el CVEL por la confluencia de dos fallas regionales que permitieron su emplazamiento. La presencia de lavas y piroclastos constituyen la mayor evidencia que permiten afirmar su origen ortomagmático por el emplazamiento de un magma de mena de óxido de hierro. La descripción de la presencia de facies volcánicas descarta cualquier hipótesis de origen de reemplazo hidrotermal o magmático-hidrotermal.

Palabras Clave: Lavas magnetita, El Laco, Norte Chile, Andes.

Financiamiento: Los trabajos y estudios en el CVEL han sido financiados por proyectos FONDEYT, DICYT-USACH, SAREC-Suecia y NSF-USA a los autores. Esta es una contribución de los proyectos de alta cordillera de los Andes Centrales, desarrollados por el Plan Nacional de Geología (PNG) del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración de Leonardo Vergara (QEPD) y Mario Rojo, jefes de Geología de CMP. Este trabajo es dedicado a Beatriz Levi (QEPD), siempre fuente de inspiración.

Referencias:

- Gardeweg, M.; Ramírez, C. 1987 La Pacana caldera and the Atana Ignimbrite-A major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of northern Chile. Bull Vol 49-547-566.
- Henríquez, F.; Martín, R.F., 1978. Crystal growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile, Can Min 16-581-589.
- Henríquez, F.; Nyström, J.O. 1998 Magnetite bombs at El Laco volcano, Chile. GFF v120-269-271.
- Knipping, J.L. et al. 2015 Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. Geology 43(7)-591-594.
- Larson, A.C.; Oreskes, N., 1993 Evidence of vapor-phase transport in the genesis of magnetite deposits at El Laco, Chile. EOS 74, 651. Maksaev et al. 1988 Aplicación del método trazas de fisión (fission track) a la datación de cuerpos de magnetita de El Laco e Incahuasi en el altiplano de la Región de Antofagasta. In Cong Geol Chil, N 5, Act. 1 B1-23. Santiago.
- Naranjo, J.A., et al. 2010 Subvolcanic contact metasomatism at El Laco Volcanic Complex, central Andes. And Geol 37(1)-110-120.
- Nyström, J.O. et al. 2016 Magnetite spherules in pyroclastic iron ore at El Laco, Chile. Am Mineral., 101(3)-587-595.
- Park, C.F. Jr. 1961. A magnetite "flow" in northern Chile, Econ. Geol. 56-431-441.
- Ramelow, J. et al. 2006 Kinematic link between episodic trapdoor collapse of the Negra Muerta Caldera and motion on the Olacapato-El Toro Fault Zone, southern central Andes. Int J Earth Sci, (95)-529-541 doi.org/10.1007/s00531-005-0042-x.
- Romero, J.E. et al. 2022 The eruptive history and magma composition of Pleistocene Cerro Negro volcano (Northern Chile): Implications for the complex evolution of large monogenetic volcanoes. J Volc Geoth Res. 429-107618.
- Seggiaro, R., et al. 2007 Hoja Geológica 2569-IV, Antofalla: Servicio Geológico Minero Argentino. Inst Geol y Rec Min, Prog Nac Cartas Geol Bol 343-62
- Villa, V. et al. 2019 Geología de las áreas Salar Punta Negra y Cerro Sur Bayo, región de Antofagasta. Sernageomin, Carta Geol Chil, Ser Geol Bás.

Análisis estadístico multivariante de la geoquímica de los sistemas geotermales de la Zona Volcánica Sur Andina, Chile

Camila Paz Poblete González¹, Daniele Tardani², Fernanda Álvarez Amado¹, Alida Pérez Fodich³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Los márgenes de placas con un contexto tectónico activo asociado a vulcanismo representan entornos favorables para el desarrollo de sistemas geotermales dominados por convección. Dentro de este contexto se enmarca la Zona Volcánica de los Andes del Sur (ZVS) con actividad volcánica y geotermal relacionada espacial y temporalmente con sistemas de fallas regionales. De su contexto geológico se destaca que los volcanes en su dominio septentrional (33°-38°S) se emplazan sobre por unidades volcano-sedimentarias meso-cenozoicas localmente intruidas por plutones del Mioceno a Plioceno, mientras que, hacia el sur de los 38°S, estos se ubican sobre rocas plutónicas meso-cenozoicas del batolito Norpatagónico (Charrier y otros, 2007; Cembrano y Lara, 2009). Las asociaciones volcanotectónicas, según la distribución espacial y organización interna de los volcanes, son diferenciadas en dos categorías: Aquellas dominadas por estructuras de rumbo de orientación NE del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (LOFS), y estructuras del basamento de orientación preferencial NW de las Fallas Transversas Andinas (ATF). Regionalmente el control estructural dado por el dominio volcanotectónico se ha definido como factor de primer orden en la composición química e isotópica de los fluidos (Sánchez y otros, 2013; Tardani y otros, 2016). Sin embargo, también se ha postulado la litología como controladora del desarrollo de sistemas geotermales (Held y otros 2018). Si bien existe una extensa data geoquímica publicada de los sistemas geotermales de la ZVS, el análisis estadístico de esta solo se ha utilizado de manera local (Negri y otros, 2018; Daniele y otros 2020). Por este motivo, mediante un enfoque estadístico multivariado buscamos evaluar los controles geológicos en la geoquímica de aguas de los sistemas geotermales a una escala regional.

Para el análisis de datos se siguió el diagrama de flujo metodológico de Cloutier y otros, 2008. Se utilizaron más de 150 muestras validadas por balance electroquímico que incluyen datos publicados de Ray y otros, 2009; Celis Abarzua, 2012; Sánchez y otros, 2013; Ruiz Velásquez, 2015; Wragge y otros, 2017; Held y otros, 2017-2018; Muñoz-Sáez y otros, 2020; Negri y otros, 2018; Daniele y otros, 2020; Pérez-Moreno y otros, 2021; y Tardani y otros, 2021. El análisis estadístico multivariado incluyó: Análisis de Clústeres Jerárquico (ACJ) para agrupar las muestras de agua en función de sus similitudes hidrogeoquímicas; y Análisis de Componentes Principales (ACP) para revelar las correlaciones entre elementos.

Los resultados muestran que los clústeres jerárquicos sugieren un control estructural y latitudinal en las muestras. Esta variación latitudinal resalta agrupando los datos geoquímicos al sur de los 44°S. Esto contrasta con jerarquización a escala local donde predomina el control estructural (LOFS y ATF) en la delimitación de clústeres en aguas termales (Daniele y otros 2020). Por otra parte, los componentes principales muestran que se requiere más de dos componentes para describir el 80% de la varianza de los datos, a diferencia de lo trabajado por Daniele y otros 2020 y Negri y otros, 2018, mostrando la variabilidad regional y validando la presencia de diversos factores geológicos e hidrogeológicos que controlan la composición de las aguas geotermales en la ZVS.

Palabras Clave: Zona Volcánica Sur, Sistemas geotermales, Hidrogeoquímica, Estadística multivariada.

Financiamiento: Este estudio fue financiado a través del proyecto Fondecyt 11220777 y la beca doctoral ANID 21230519.

Referencias:

- Celis Abarzua, R. A. (2012). Caracterización geoquímica del sistema geotermal Termas de Puyehue-Aguas Calientes, Región de los Lagos, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 96 pp., Santiago.
- Cembrano & Lara (2009). Tectonophysics, 471(1-2), 96-113.
- Charrier y otros (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.
- Cloutier y otros (2008). Journal of Hydrology, 353(3-4), 294-313.
- Daniele y otros (2020). Journal of Geochemical Exploration, 218, 106611.
- Held y otros (2017). Geotherm Res Council Trans, 41.
- Held y otros (2018). Geothermics, 74, 226-239. Muñoz-Saez y otros (2020). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 406, 107065.
- Negri y otros. (2018). Journal of Geochemical Exploration, 185, 1-13.
- Pérez-Moreno y otros (2021). Applied Geochemistry, 128, 104953.
- Ray y otros (2009). Chemical Geology, 266(1-2), 38-49.
- Ruiz Velásquez, B. S. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de manifestaciones termales de la región de Los Lagos, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 166 pp., Santiago.
- Sánchez y otros (2013). International Geology Review, 55(11), 1384-1400.
- Tardani y otros (2016). Geochim. Cosmochim. Acta 184, 193-211.
- Tardani y otros (2021). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 414, 107228.
- Wragge y otros (2017). Chemical Geology, 466, 545-561.

Interacción agua-roca y contribución magmática en sistemas geotermales de la Zona Volcánica Sur: un acercamiento isotópico desde el Li, B y Sr

Sebastián Rivas Bravo¹, Pablo Sánchez Alfaro¹, Fernanda Álvarez Amado², Daniele Tardani³, Linda Godfrey⁴, Catalina Fica Gutierrez¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de La Tierra, Avenida Eduardo Morales Miranda, Valdivia, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de La Tierra, Concepción, Chile

(3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(4) Rutgers University, Department of Earth and Planetary Sciences, NJ 08854, Piscataway, USA

En la Zona Volcánica Sur de Chile (ZVS, 33-46°S) la interacción entre los sistemas de falla regionales y los centros volcánicos da lugar a diferentes asociaciones tectono-magmáticas que controlan el desarrollo de sistemas geotermales. En este contexto, estudiar el comportamiento de elementos móviles en fluidos termales provee oportunidades para comprender cómo se distribuyen estos elementos en un sistema hidrotermal y qué procesos controlan su concentración. El objetivo de este trabajo es comprender la influencia que ejerce la interacción tectono-volcánica en los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en los sistemas geotermales del sur de Chile y su efecto en la composición química e isotópica de los fluidos. Para ello, se seleccionaron dos sistemas geotermales de la ZVS que se encuentran en contrastantes asociaciones tectono-volcánicas: (1) los Géiseres de Alpehúe, ubicados en las laderas del Volcán Solipulli, el cual presenta una caldera volcánica elongada en dirección NE, y (2) el sistema geotermal del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC), donde el lineamiento volcánico sigue una orientación NW. Las metodologías utilizadas son el análisis químico de elementos mayores, trazas e isótopos estables de litio ($\delta^7\text{Li}$), boro ($\delta^{11}\text{B}$) y estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en muestras de aguas termales, meteóricas y rocas volcánicas. En Alpehúe, los resultados químicos e isotópicos indican un estado cercano al equilibrio entre el agua geotermal y las rocas volcánicas. Por su parte, en Puyehue-Cordón Caulle la señal isotópica está compartimentada en dos zonas. En primer lugar, en el sector de aguas calentadas por vapor (*steam-heated*), caracterizado por la presencia de fumarolas, fluidos ácidos de alta temperatura y alteración argílica, la señal isotópica indica un aporte de fluidos magmáticos y una lixiviación superficial de las rocas volcánicas alteradas. El segundo segmento del PCC consiste en los manantiales periféricos del sistema, donde las características son de mediana temperatura ($T = 50^\circ\text{C}$) y pH neutro a ácido, aquí la señal sugiere un equilibrio agua-roca remanente de un potencial reservorio geotermal profundo. En síntesis, los resultados del Puyehue-Cordón Caulle son consistentes con un modelo de reservorio geotermal estratificado, en el que el agua termal adquiere la señal isotópica de la roca hospedante de cada reservorio, y con una contribución de fluidos magmáticos en el segmento de aguas vapor-calentadas. El análisis multi-isotópico realizado en este estudio permitió determinar tres procesos principales que controlan la distribución del Li, B y Sr en las aguas geotermales de cada sistema. Estos procesos incluyen: (1) la interacción calor-fluido-roca, que está controlada por la señal isotópica de cada roca hospedante, (2) la mezcla con fluidos magmáticos, que presumiblemente estaría controlada por los sistemas de falla regionales en los que se emplazan los sistemas, y (3) la alteración hidrotermal, que podría condicionar la lixiviación de rocas y la sobreimpresión de su señal isotópica en el agua termal.

Palabras Clave: Isótopos de Li-B-Sr, Sistemas geotermales, Solipulli, Puyehue-Cordón Caulle, Hidrogeoquímica.

Financiamiento: Los trabajos en terreno y análisis químicos realizados en este estudio fueron financiados por el proyecto FONDECYT 1201219 "The optimal geological conditions that form high enthalpy, metal-rich hydrothermal systems in the Andes: Thermodynamic and mechanical numerical approach" adjudicado por el profesor Dr. Pablo Sánchez Alfaro (UACH).

Modelo de resistividad eléctrica del volcán Cerro Overo en los Andes Centrales

Noemi Alarcón Márquez¹⁻², Verónica Oliveros¹⁻³, Daniel Díaz¹⁻⁴

(1) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Kkelar Volcanes, Av. Angamos 0660, Antofagasta, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

El volcán Cerro Overo es un centro monogenético de edad Holocena ubicado en el norte de Chile en la Zona Volcánica Central de los Andes, en el complejo volcánico Altiplano-Puna en la región de Antofagasta. En base a información petrológica y datos geoquímicos ha sido clasificado por Ureta (2015) como un cráter de explosión freatomagmática generadora de una estructura tipo maar de 600 m de diámetro. Unos 5 km al SE se encuentra el domo basáltico “La Albóndiga” (Ureta et al. 2020), de la misma edad y arreglo mineralógico que el volcán Cerro Overo pero que presenta morfología de domo. Ambos centros eruptivos tienen de las composiciones menos diferenciadas de los volcanes del norte de Chile (54% SiO₂) y a pesar de la posible baja viscosidad de sus magmas no se observaron flujos de lava.

El interés radica en dilucidar las condiciones que impidieron que lavas tan poco diferenciadas no fluyeran y formaran morfologías tan distintas en centros eruptivos cercanos. Se infiere que la morfología actual del volcán Cerro Overo es el resultado de la interacción con fluidos durante su ascenso.

Para observar la estructura en profundidad se realizaron 6 sondeos magnetotelúricos (MT) de banda ancha en la periferia del centro eruptivo logrando identificar un aumento de resistividad con la profundidad. Se cree que el modelo de resistividad eléctrica (TM) permitirá identificar los fluidos involucrados en la erupción del volcán Cerro Overo, las estructuras típicas de los volcanes tipo maar y las particularidades del basamento que permitieron la formación de domos basálticos.

Palabras Clave: Magnetotelúrica, Cerro Overo, Volcán, Domos, Monogenético.

Financiamiento: Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Kkelar Volcanes.

El rol de las estructuras heredadas en la evolución del volcanismo neógeno en el Área Volcánica Lazufre (25°-25°40'S), sur de los Andes Centrales, Norte de Chile

Matías Arriagada¹⁻³, Rodrigo González²⁻³, Gabriel Ureta²⁻³⁻⁴, Joaquín Cortéz-Aranda⁵, Idir Bascuñán¹⁻³, Gonzalo Moreno¹⁻³

(1) Universidad Católica del Norte, Programa de Magíster en Ciencias mención Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico, Ckelar Volcanes, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(4) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(5) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

El ascenso y emplazamiento del magma a través de la corteza superior se encuentran en estrecha relación con su estructura y estado de stress tectónico (Tibaldi, 2015). Los centros volcánicos y sus estructuras alimentadoras responden a un control estructural, orientándose de forma paralela al máximo stress compresivo horizontal (σ_{Hmax}) (Paulsen y Wilson, 2010; Tibaldi et al., 2017), por lo que su morfología y distribución pueden proporcionar información importante sobre la dinámica de las erupciones y la tectónica (Bemis and Ferencz, 2017; Jaldín et al., 2023). El Área Volcánica Lazufre (AVL) es un segmento del arco volcánico localizado en la porción sur de la Zona Volcánica Central (25° a 25°40'S) (Naranjo et al., 2019). Observaciones mediante InSAR muestran que el AVL experimenta una deformación superficial de gran escala, abarcando un área de ~ 1.600 km² (Pritchard & Simons, 2002; Pritchard & Simons, 2004; Froger et al., 2007). Esta señal de deformación superficial implica un alzamiento del terreno, con velocidades de inflación de 3 cm/año en el centro, y cerca de 1,5 cm/año en los márgenes externos del área (Froger et al., 2007; Ruch et al., 2009). Este alzamiento estaría siendo provocado por un cuerpo magmático sobrepresurizado, localizado entre 7-15 km de profundidad, expandiéndose y propagándose lateralmente a velocidades por sobre los 4 km/año (Froger et al., 2007; Ruch et al., 2008; Ruch et al., 2009; Anderssohn et al., 2009).

De acuerdo con Naranjo et al. (2018), en la zona de Lazufre se reconoce una serie de fallas inversas de vergencia este y orientación NE-SW, asociadas a la falla Pedernales-Arizaro, las que se localizan en el margen noreste del salar de Río Grande y del salar de Aguilar. Otra estructura principal es la falla Imilac-Salina del Fraile, falla de orientación NNW-SSE y cinemática dextral que se extiende desde el salar de Punta Negra hasta el salar de Antofalla, pero cuya traza en el área de estudio es completamente inferida (Naranjo y Cornejo, 1992; Naranjo et al., 2019). En base a relaciones geográficas, Naranjo et al. (2019) proponen que la presencia de la falla Pedernales-Arizaro y de la falla Imilac-Salina del Fraile (conjugadas a ~30°), habrían favorecido la acumulación y migración del volcanismo desde el sector de la caldera Los Colorados hacia el área de Lazufre, a través de estructuras heredadas paralelas a la traza de la falla Imilac-Salina del fraile. Para comprender cuál es el rol que desempeñan las estructuras heredadas en la ocurrencia y distribución del volcanismo neógeno en el Área Volcánica Lazufre, y qué relación guardan con la señal de deformación superficial, se realizó un análisis morfoestructural de alineamientos de centros volcánicos en base a la metodología de Paulsen & Wilson (2010), bajo el supuesto de que los cráteres elongados son la expresión superficial de diques alimentadores que se emplazan paralelos a σ_{Hmax} (Nakamura, 1977).

A partir de nuestros resultados, hemos podido determinar que el volcanismo en el Área Volcánica Lazufre se encuentra controlado por dos sistemas estructurales principales: (i) un sistema de fallas transtensional de orientación NW-SE y cinemática sinistral, y (ii) una serie de estructuras de orientación NE-SW, asociadas a la falla inversa de vergencia este Pedernales-Arizaro. La gran mayoría de los alineamientos volcánicos responden a una geometría de tipo Riedel, estando asociados al sistema transtensional de orientación NW-SE. Este sistema de fallas presenta una dirección de desplazamiento principal con un rumbo de N163°. Esta zona de transtensión habría favorecido la acumulación y ascenso de magma en Lazufre, originando el patrón de distribución observado en superficie. Esta investigación aporta nuevos conocimientos sobre los procesos geológicos y tectónicos que han dado forma al Área Volcánica Lazufre y contribuye a una mejor comprensión respecto a la evolución de la actividad volcánica en ambientes tectónicos transtensionales.

Palabras Clave: Área Volcánica Lazufre, Tectónica transtensional, Andes Centrales, Análisis Morfoestructural, Deformación volcánica.

Crecimiento volcánico endógeno por intrusión de diques en islas volcánicas oceánicas. Implicaciones en el desencadenamiento de colapsos laterales en El Hierro (Islas Canarias, España)

Laura Becerril Carretero¹, John Browning²

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins, 611, Rancagua, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica, Departamento de Ingeniería de Minería, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago de Chile, Chile

Las intrusiones magmáticas son una de las estructuras más singulares y comunes en los terrenos volcánicos. A veces, las inyecciones de magma a través de fracturas recién formadas o preexistentes pueden llegar a la superficie y producir erupciones volcánicas, contribuyendo así al crecimiento del volcán mediante la adición de material nuevo en su superficie. Pero aun cuando no alcanzan la superficie, producen un aumento en el volumen total de los sistemas volcánicos al provocar una extensión de la corteza cuando intruyen subverticalmente en forma de diques o aumentando el espesor de la corteza cuando las intrusiones son subhorizontales en forma de diques. El crecimiento de la corteza por intrusiones es un mecanismo fundamental en el control de la evolución de las islas volcánicas. En particular, las tensiones relacionadas con la extensión de la corteza debido a la intrusión de diques pueden causar inestabilidad de taludes y generar colapsos laterales catastróficos.

En este trabajo investigamos el sistema subvolcánico somero de El Hierro (Islas Canarias, España) a través del análisis de diques y fisuras eruptivas, y estimamos la extensión de la corteza (H%) debido a la intrusión de diques durante el crecimiento subaéreo de la isla. Hemos estudiado diques a lo largo de hasta diecisiete galerías de agua perforadas para la extracción de agua alrededor de la isla, y cuatro secciones superficiales en los escarpes de los valles de deslizamiento que caracterizan la morfología de la isla. Además, las fisuras eruptivas se han asumido como diques de alimentación, de tal forma que hemos calculado la extensión cortical en superficie.

El crecimiento de la corteza por intrusiones laminares es muy bajo en las sucesiones rocosas más recientes, 0,04%, y aumenta gradualmente hacia el eje de las zonas de rift. Se ha medido un valor máximo de 25,15% en el rift del noreste, lo que indica una extensión sustancial que podría considerarse como un factor determinante para el desarrollo de deslizamientos.

Palabras Clave: Extensión cortical, Intrusiones, Islas volcánicas oceánicas, colapsos laterales.

Role of fault intersections in magma transport in active volcanic arcs: Nevados de Chillán Volcanic Complex (36.8°S)

Javier Espinosa-Leal¹⁻², Sophia Gahr³, Katharina Maetschke³, Valentina Mura¹⁻², Flavia Rojas¹⁻², Karin Hofer¹⁻², Carla Casado¹, José Cembrano¹⁻², John Browning¹⁻², Max Moorkamp³, Thomas Mitchell⁴, Philip Meredith⁴, Gloria Arancibia¹⁻²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotécnica, Ingeniería, Vicuña Mackenna 680, Santiago, Chile

(2) Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Ludwig Maximilian University, Department of Earth and Environmental Sciences, Geophysics, Geschwister Scholl Platz 1, 80539, Munich, Germany

(4) University College London, UCL Earth Sciences, Gower St, London WC1E 6BT, London, United Kingdom

Understanding the nature of the relationship between fault and fracture systems and the storage and propagation of magma in volcanic systems represents a key objective to advance the understanding of how volcanic systems are built and evolve in continental volcanic arcs subduction zone (Lara et al., 2004; Lara et al., 2006; Cembrano and Lara, 2009; Chaussard and Amelung, 2014). In this sense, there are various volcanic complexes spatially related to fault systems and particularly located on the intersection of the projections of these faults, such as the Laguna del Maule, Nevados de Chillán, Puyehue-Cordón Caulle volcanic complexes, among others. Despite this evident spatial relationship, little is known regarding the nature of fault intersections and the possible control they might exert on magma emplacement and the internal and external anatomy of volcanic complexes. In this sense, the Nevados de Chillán Volcanic Complex (NChVC, 36.8°S) shows some characteristics that make it a great study case to address this problem. First, a direct spatial relationship with fault systems such as the Las Trancas fault (LTF, this work) oriented NE-SW and the Cortaderas-Chillán Fault (CChF; Cardona et al., 2021) oriented NW-SE and second, the development of two sub-complexes: Cerro Blanco to the north and Las Termas to the south, each one spatially associated to zones of fault intersections.

To advance in answering these questions, in this work we use various methodologies such as the measurement of structures in the field, the elaboration of three-dimensional models and analysis of structures of the different outcrops around the NChVC (Aerial Structure from Motion), and the use of resistivity measurements from magnetotelluric method to develop a complete model of both the features observed on the surface and in the depth of the NChVC, that allows us to visualize the internal anatomy of its reservoir and the magma plumbing systems, thus advancing in the understanding of the complex relationships between fault systems and the control that their intersections could exert on the evolution of volcanic systems.

Keywords: Structural geology, Magma transport, Aerial Structure from Motion, Magnetotelluric.

Financing: This work is financed by the FONDECYT project N°1210591 and by the FONDECYT project N°1220729. Javier Espinosa Leal's PhD studies are funded by ANID – Beca Doctorado Nacional N° 21212164. Valentina Mura's PhD studies are funded by ANID - Beca Doctorado Nacional n° 21210890.

References:

- Cardona, C., Gil-Cruz, F., Franco-Marín, L., San Martín, J., Valderrama, O., Lazo, J., ... & Bucarey, C. (2021). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex–Chilean Andes (2012 to 2020). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 420, 107409.
- Cembrano, J., & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471(1-2), 96-113.
- Chaussard, E., & Amelung, F. (2014). Regional controls on magma ascent and storage in volcanic arcs. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 15(4), 1407-1418.
- Lara, L. E., Lavenu, A., Cembrano, J., & Rodríguez, C. (2006). Structural controls of volcanism in transversal chains: resheared faults and neotectonics in the Cordón Caulle–Puyehue area (40.5 S), Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(1-2), 70-86.
- Lara, L. E., Naranjo, J. A., & Moreno, H. (2004). Rhyodacitic fissure eruption in Southern Andes (Cordón Caulle; 40.5 S) after the 1960 (Mw: 9.5) Chilean earthquake: a structural interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138(1-2), 127-138.

Estudio del sistema magmático del Volcán Llaima durante el Holoceno, Región La Araucanía, Chile

Ignacio Gómez Gómez¹⁻², Daniel Díaz Alvarado¹⁻³, Ángel Castruccio Álvarez²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Kkelar volcanes, Avenida Angamos 610, Antofagasta, Chile

El volcán Llaima es un estratovolcán compuesto, el cual consiste de un edificio volcánico mixto construido sobre un volcán escudo (Naranjo J. & Moreno H., 2005) sobre este antiguo volcán escudo se desarrolló un cordón fisural en dirección noreste al lado occidental del volcán y posteriormente se construyó el cono principal. Se puede observar que el edificio presenta dos cimas, donde la cima que se encuentra al norte es el cono principal con una altura de 3.179 m.s.n.m., el cual posee un cráter abierto de aproximadamente 300 m de diámetro y una cima sur de 2.930 m.s.n.m..

Además, el complejo volcánico presenta aproximadamente 40 centros adventicios de escoria, ubicados principalmente en flanco occidental y nororiental, y también algunos otros ubicados en el flanco sur y suroccidental. La actividad en este volcán se ha desarrollado principalmente durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno, donde se han podido definir tres unidades evolutivas (Naranjo J. & Moreno H., 2005). La primera denominada "Llaima Ancestral" y la cual corresponde al volcán escudo, representada principalmente por lavas andesíticas-basálticas (52,5-56,64% SiO₂), este edificio volcánico habría colapsado debido a una gran erupción explosiva (aproximadamente 13 ka), la cual generó una caldera y un gran depósito ignimbítico andesítico-basáltico, donde esta etapa continuó hasta aproximadamente 7 ka con erupciones plinianas y flujos piroclásticos dacíticos y andesíticos (Naranjo J. & Moreno H., 2005). La segunda etapa consta de una unidad fisural ubicada en el flanco occidental y norte del volcán, el cual se encuentra enmarcado por diferentes centro eruptivos adventicios y el cual se denomina "Llaima Fisural" y el material emitido consta principalmente de andesitas-basálticas a andesitas (54-58,6% SiO₂). Por último, la última etapa corresponde a la construcción del edificio principal, el cual habría iniciado con posterioridad a los 3 ka, con episodios efusivos y explosivos (Naranjo J. & Moreno H., 2005), con material emitido de composición principalmente andesita-basáltico (51-55% SiO₂).

Algunos estudios recientes en el volcán Llaima, bajo la evidencia petrológica de productos en este volcán han establecido una profundidad para el sistema magmático entre 0-4 km (Bouvet de Maisonneuve, C., Dungan, M. A., Bachmann, O., Burgisser, A., 2012) bajo el edificio principal, mientras que otro estudio en base a metodologías sísmicas han propuesto una profundidad del reservorio principal entre 8-13 km de profundidad bajo el edificio principal (Bishop, J. W., Lees, J. M., Biryol, C. B., Mikesell, T. D. & Franco, L., 2018). Además, en base a trabajos con magnetotelúrica en la zona, se ha propuesto un reservorio más profundo vinculado al sistema magmático antiguo del volcán Llaima a una profundidad de 20 km (Krawczyk, C. M., Mechie, J., Lüth, S., Tašárová, Z., Wigger, P., Stiller, M. & Bataille, K., 2006).

El objetivo principal de este trabajo consiste en plantear un modelo conceptual del sistema magmático del Volcán Llaima, para lo cual se busca implementar dos metodologías diferentes, las cuales corresponden por un lado la magnetotelúrica con datos obtenidos durante el verano de 2023 (y futura campaña de terreno en 2023-2024), buscando obtener un modelo tridimensional de la estructura de resistividad eléctrica del volcán Llaima, y la implementación del modelo de conducto volcánico de Kozono et al. (2009), donde el complemento de cada uno de estas metodologías, nos podría dar luces de la profundidad y su distribución espacial del sistema magmático. En el caso del modelo de Kozono et al., se utilizará principalmente información bibliográfica para diferentes parámetros de entrada que necesita el modelo, como lo es la composición del magma, contenido de agua, propiedades físicas del magma, entre otros.

Palabras Clave: Sistema magmático, Magnetotelúrica, Modelo de conducto volcánico, Volcán Llaima.

Financiamiento: Este proyecto será financiado a través de los siguientes proyectos FONDECYT: FONDECYT 1211257 FONDECYT 1211869.

Referencias:

- Bishop, J. W., Lees, J. M., Biryol, C. B., Mikesell, T. D., & Franco, L. (2018). Examining the interior of Llaima Volcano with receiver functions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 352, 1–9.
- Bouvet de Maisonneuve, C., Dungan, M. A., Bachmann, O., & Burgisser, A. (2012). Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean Southern Volcanic Zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 211-212, 76–91.
- Krawczyk, C. M., Mechie, J., Lüth, S., Tašárová, Z., Wigger, P., Stiller, M. & Bataille, K. (2006). Geophysical signatures and active tectonics at the south-central Chilean margin. *The Andes: Active Subduction Orogeny*, 171-192.
- Kozono, T., & Koyaguchi, T. (2009). Effects of relative motion between gas and liquid on 1-dimensional steady flow in silicic volcanic conduits: 1. An analytical method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 180(1), 21-36.
- Kozono, T., & Koyaguchi, T. (2009). Effects of relative motion between gas and liquid on 1-dimensional steady flow in silicic volcanic conduits: 2. Origin of diversity of eruption styles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 180(1), 37-49.
- Naranjo, J.A; Moreno, H. (2005). Geología del volcán Llaima, Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 88, 33 p., 1 mapa escala 1:50000, Santiago.

Análisis morfoestructural y alineamiento volcánico de la Cordillera Principal, en los Andes Centrales entre los 17°-18°S

Gonzalo Moreno Herrera¹⁻³, Rodrigo Gonzáles Tapia²⁻³, Matías Arriagada Castro¹⁻³, Idir Bascuñan Espindola¹⁻³

(1) Programa de Magíster en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Departamento de Ciencias Geológicas Facultad de Ing. y Cs. Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 1660, Antofagasta, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico, Ckelar Volcanes, Antofagasta

El presente trabajo aborda el estudio de los sistemas estructurales presentes en el área de Visviri-Villa Industrial (17°29'53"- 18°S) y como estos están relacionados al alineamiento de los volcanes y remanentes volcánicos del Pleistoceno, los cuales se encuentran posicionados en una franja con dirección NW-SE.

Inmediatamente al noroeste del área de estudio, en el sur de Perú, se encuentra el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), que está conformado por fallas inversas sinestrales con dirección NW-SE. Asimismo, estas estructuras tienen vergencia hacia al noreste y al suroeste, siendo esta última predominante. Estas estructuras no son reconocidas en territorio chileno. Si bien, en trabajos anteriores se han encontrado estructuras presentes en el área, estas no han sido mayormente estudiadas y tampoco se ha determinado su relación con el SFI. Mediante la observación de imágenes satelitales y modelos de elevación digital fue posible el estudio de la morfología del terreno, la identificación de estructuras y la temporalidad de los eventos que estas involucran. Además, con la forma y disposición de los edificios volcánicos y sus respectivos domos, se estudió el alineamiento volcánico presente. A partir de los datos obtenidos, hay evidencias de estructuras inversas con vergencia opuesta que se extienden bajo la cobertura cuaternaria, dichas estructuras estarían alzando el área de estudio desde el Eoceno Superior y el Mioceno Medio. Luego de esto, habría un cese del alzamiento entre el Mioceno Superior y el Plioceno Inferior. Posteriormente, habría una reactivación del sistema, acotada ampliamente entre Plioceno y el Holoceno. Estas estructuras son correlacionables con el SFI hacia el noroeste y se cree que pueden tener relación con el West-Vergent Thrust System, ubicado hacia el sur del área de estudio. Además, estas estructuras habrían facilitado el ascenso del magma que originó el alineamiento de los volcanes del Pleistoceno, el cual registra una dirección de máximo acortamiento N38°E.

Palabras Clave: Andes centrales, Cordillera Principal, Sistema de Fallas Incapuquio, Alineamiento volcánico.

Response of volcanic-hydrothermal systems to large climatic fluctuations

Carolina Muñoz Saez¹⁻³, Noah Randolph-Flagg², Robert Crummett¹, Seth Saltiel¹⁻⁴

(1) University of Nevada Reno, Department of Geological Sciences and Engineering, College of Science, 664 N Virginia St, Reno, NV 89557, Reno Nevada, United States

(2) Blue Marble Space Institute of Science, 600 1st Avenue, 1st Floor, Seattle, Washington, United States

(3) University of Nevada Reno, Department of Geological Sciences and Engineering, College of Science, 664 N Virginia St, Reno, NV 89557, Reno Nevada, United States

(4) University of Nevada Reno, Department of Geological Sciences and Engineering, College of Science, 664 N Virginia St, Reno, NV 89557, Reno Nevada, United States

The response of volcanoes and groundwater systems to glacier fluctuations, as well as present and past climate changes, is a key unknown in Earth Science. Volcanic responses to changes in ice volume have been associated with pressure changes leading to silicate melt production, movement, and eruptions. Hydrological systems are affected by glacier cycles, as the groundwater reservoirs can respond to changes in surface loading and water recharge into the subsurface. Hydrothermal activity involves elements of both systems. However, the linkages and the mechanisms operating between glacial cycles, volcanism, and hydrothermal activity are still poorly understood. Currently, alpine glaciers on many active volcanic areas are rapidly receding due to global warming, increasing the hazard for volcanic, phreatic, and hydrothermal explosions. Glacier recession can change water storage, flow, and chemistry, thus affecting hydrothermal activity. Moreover, knowing how hydrothermal systems respond to large climatic changes may contribute to understanding the evolution of sources of energy and critical metals moved and deposited by the circulation of fluids in the crust.

Important questions to be addressed include: How do hydrological, hydrothermal and/or volcanic systems respond to climate change and glacier expansion and retreat? What are the timing and mechanisms that control these responses? Alpine glaciers around volcanic areas in the Andes region and world-wide are shrinking due to modern climate trends. Providing answers to these questions will have significant impacts on hazard assessments (phreatic eruptions and hydrothermal explosions), geothermal and mineral exploration.

We aim to make quantitative estimation of the hydrothermal responses to glacial loading/unloading, changes in water and heat supply using field data (estimation of ice thickness) and numerical models of multiphase flow and deformation in heterogeneous porous media. Deglaciation occurring during the Pleistocene/Holocene in the Central Andes in El Tatio Area can provide clues to understand the timing of these responses. Results from this study will provide a better understanding of the interrelated and competing controls of hydrothermal responses (for example, glacier distribution, thickness, and rates of advance/recession, rheology, permeability, and reservoir depth).

Keywords: El Tatio, Glaciers, Central Andes, Hydrothermal, Loading.

Financing: National Science Foundation Award 2143533.

Acknowledgments: NSF Award Number: 2143533 Project Title: Collaborative Research: EAR-Climate: Linkages Between Glacio-climatic, Hydrothermal, and Volcanic Processes in the Central Andes.

Structural controls on fluid circulation in the Nevados de Chillán Volcanic Complex (Southern Volcanic Zone, Chile)

Valentina Mura¹⁻², Javier Espinosa Leal¹⁻², Gloria Arancibia¹⁻², John Browning¹⁻², David Healy⁴, Camila López Contreras¹, Diego Morata²⁻³, Santiago Maza²⁻³, Flavia Rojas¹⁻², José Cembrano¹⁻², Thomas Mitchell⁵

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(2) Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) University of Aberdeen, School of Geosciences, Aberdeen, UK

(5) University College London, Department of Earth Sciences, London, UK

The volcano-hosted geothermal system of Nevados de Chillán Volcanic Complex (NChVC) (Southern Volcanic Zone, Chile) shows evidence of cortical fluid flow related to short- and long-term tectonism as evidenced by thermal hot springs and high-temperature fumaroles, spatially associated with potentially seismogenic faults (e.g., Lupi et al., 2020). However, there remains a lack of understanding on the influence of fractures and their role in channeling the flow of hydrothermal or magmatic fluids and their role in accommodating deformation at active volcanoes that host geothermal systems, generally, and especially at the NChVC. The configuration of a fracture network exerts a primary control on fluid circulation and can vary spatially and as a function of lithology. It may act as a zone that favours fluid flow or, conversely, may also serve as a hydraulic barrier to fluid flow. The deformational behaviour of pre-existing fractures and faults and their response to local and regional stress fields is also a key aspect for establishing the fluid-flow potential conductivity.

The major structural domains documented in this work were defined based on a combination of lineament analysis from satellite images (1:50.000), a field study (1:100 and 1:500) and the review of previous works in the area (e.g., Naranjo et al., 2008, Meulle-Stef, 2017, Lupi et al., 2020). Within these areas, we defined four key sites from west to east: Shangri-La (SL), Valle Las Trancas (LT), Valle Hermoso (VH), and Las Termas-Olla de Mote (OM). At each site, a mesoscale collection of fracture attributes (orientation, opening or infill, spacing, intensity, and density) was performed with 1D linear and 2D circular scanline methods. The collected structural data were inverted from fault-slip and fracture data from each site. Using Faultkin 8 software (Marret & Allmendinger, 1990), we determined the strain conditions present when the structures formed. Paleostress analysis was carried out using the MIM software (Multiple Inverse Method) (Yamaji, 2000) to estimate the stress field operating during the formation of the faults and the GARCMB genetic algorithm was used for open fractures (Yamaji, 2016). Finally, under the calculated stress field regime, a slip (Ts) and dilation (Td) tendency analysis for the structures was performed, which is the tendency of a plane to slip and dilate under an applied stress state (Ferrill et al., 1999).

The orientation of the main lineaments described in the area (E-W, N40-60E, N40-60W and NS) were examined at the outcrop scale. It was possible to identify subvertical E-W and WNW sinistral (normal component) transcurrent faults, clearly identified in the LT site as a major geomorphological and structural feature. A secondary population of N30-70E striking high-angle faults with dextral kinematics, are identified in LT and VH sites. Less abundant families of faults are NS to NNE-striking and NW reverse dextral faults, both observed in LT, OM and VH sites (Morata et al., 2023). Also, a series of low-angle reverse faults subparallel to the stratification of the Cura-Mallín Formation are found in the OM. In LT and SL sites open fracture sets are mainly N30E and N60E respectively, in VH are N45E and in LT-OM there is no main family of fractures. Also there exists a great difference in fracture density of the different lithologies, related with the basement (crystalline rocks) units that form both the ancestral and present-day volcanic complex (mainly lavas). The basement units present fracturing due to brittle tectonic deformation and unroofing, while the units of the volcanic complex present fractures predominantly due to emplacement and cooling of the lavas themselves (columnar joints). Dikes have predominantly NE to ENE striking (Lupi et al., 2020).

Fault-slip data analysis shows a transcurrent strike-slip regime with NE trending subhorizontal σ_1 and another transcurrent strike-slip regime with ENE-trending subhorizontal σ_1 . The NE trending subhorizontal σ_1 tectonic regime is compatible with NE-striking fractures and dikes. Finally, results of inversion of open fractures analysis show a compressional regime with NE -trending subvertical σ_1 . Our results also show a complexity in the spatial distribution of local stress fields within the strike-slip system, which are being studied and understanding their role in the geometrical distribution of fluid flow.

This work represents the opportunity to understand the fluid flow in Andean fractured systems by directly quantifying fracture connectivity at different scales and these findings contribute to the current understanding of the fractured reservoir.

Keywords: Volcano, Faults and Fractures, Fractured geothermal system, Fluid Flow, Nevados de Chillán.

Financing: This work is a contribution to the ANID-FONDECYT Projects 1220729 & 1210591 and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA) ANID-FONDAP Project ACE210005. Valentina Mura and Javier Espinosa-Leal's PhD studies are funded by ANID - Beca Doctorado Nacional n° 21210890 and N°21212164, respectively.

References:

- Ferrill, D. A., Smart, K. J., & Morris, A. P. 2020. Fault failure modes, deformation mechanisms, dilation tendency, slip tendency, and conduits v. seals. Geological Society, London, Special Publications, 496(1), 75-98.
- Lupi, M., Trippanera, D., Gonzalez, D., Damico, S., Acocella, V., Cabello, C., Tassara, A., 2020. Transient tectonic regimes imposed by megathrust earthquakes and the growth of NW-trending volcanic systems in the Southern Andes. Tectonophysics, 774.
- Marrett, R.A. and Allmendinger, R.W. (1990) Kinematic Analysis of Fault-Slip Data. Journal of Structural Geology, 12, 973-986.
- Meulle-Stef, M. 2017. Modelo Estructural y régimen de paleo-esfuerzos para el Complejo Volcánico Nevados de Chillán, región del Bio Bio, Chile. Memoria de Título, Departamento de Geología Universidad de Concepción, Chile. 105.
- Morata, D.; Gallardo, R.; Maza, S.; Arancibia, G.; López-Contreras, C.; Mura, V.; Cannatelli, C.; Reich, M. 2023. Hydrothermal Alteration in the Nevados de Chillán Geothermal System, Southern Andes: Multidisciplinary Analysis of a Fractured Reservoir. Minerals, 13, 722.
- Naranjo, J.A., Gilbert, J., Sparks, R.S., 2008. Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Cart. Geológica Chile, Ser. Geol. Básica 114, 32.
- Yamaji, A. 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. Journal of Structural Geology, 22(4), 441-452. Yamaji, A. 2016. GARCMB Software Package.

Evolución geológica de la Caldera Agua Nueva en la precordillera de Copiapó (27°35' – 27°43' s), Región de Atacama, Chile

Felipe Andrés Alquinta Herrera¹, Paulina Fuentes Molina¹, Natalia Rodríguez Rodríguez¹

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Copayapu #485, Copiapó, Chile

La Caldera Agua Nueva corresponde a una Caldera de colapso de edad Paleocena-Eocena, orientada NE-SW. Presenta muy buena preservación y está delimitada por dos fallas, al W por una falla normal, y al E, por una falla inversa. Es parte de las calderas anidadas dentro de la Megacaldera Carrizalillo, la cual hizo erupción en el Cretácico superior, y que luego el magma migró a niveles someros, formando calderas de diversas morfologías dentro de la misma Cuenca Hornitos, aunque existen calderas contemporáneas fuera de la misma cuenca. Se pueden apreciar los depósitos volcánicos y piroclásticos, orientados de base a techo, de W a E. con una inclinación hacia el NE. La Caldera presenta flujos lávicos, flujos ignimbriticos y megabloques de reoignimbritas. La secuencia de lavas corresponde a Andesitas de color morado, con textura porfídica y afieltrada de Plg. Hacia el techo se encuentran facies autoclásticas de autobrechas andesíticas, alcanzando espesores de 80 [m] y se encuentra debajo en contacto erosivo con las ignimbritas. Los flujos ignimbriticos son de composición dacítica. Presenta matriz soportada de tamaño cinerítico, soldados, formando fiammes, de textura eutaxítica. Compuesta por líticos volcánicos de hasta 1,1 cm de composición andesítica, subredondeados-subangulosos y fiammes de color oscuro de 3,0 [cm]. Presenta una potencia de hasta 700 m en la parte central de la Caldera con inclinación hacia el NE. Los Megabloques de reoignimbrita se distribuyen cercanos a la falla anular occidental. Alcanzando los 50 [m] de diámetro. Son redondeados y están inmersos en una matriz de toba lítica-pumícea. Existe alteración hidrotermal a óxidos de Fe cercano a las fracturas anulares y CAN-22-01. Así también, se encuentran Plg alteradas, de intensidad moderada a alta de Sericita y arcillas. El flujo ignimbritico se encuentra intercalado con niveles coherentes de facies no explosivas de fragmentación autoclástica formando autobrechas andesíticas. Se observan depósitos sedimentarios en la parte W de la Caldera, y previos al colapso de la columna eruptiva.

Palabras Clave: Caldera, Colapso, Volcanismo, Ignimbrita

Agradecimientos: DIUDA 22405 Evolución tectónica durante el Cretácico superior-Paleoceno en la pre-cordillera de Copiapó: Megacaldera Carrizalillo y calderas anidadas a cargo de la Dra. Paulina Fuentes Molina.

Referencias:

- Branney, M.J., Kokelaar, P., 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites - Geol. Soc. London, Memoirs, 27, 1-143.
- Fisher, R. 1966. Rocks composed of volcanic fragments and their classification. Earth Science Reviews, 287-298.
- Iriarte, S., Arévalo, C., & Mpodozis, C. (1999). Hoja La Guardia, Región de Atacama. Servicio nacional de geología y minería.- Lipman, P.W., 1995. Subsidence of ash-flow calderas; role of magma chamber geometry. IUGG Gen. Assem. 21 (Week A), 452.
- Lipman, P.W., 2000b. Calderas. In: Sigurdsson, H. (Ed.), Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Francisco, pp. 643 – 662.
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. Journal of Taibah University for Science, 9(2), 155–166. doi:10.1016/j.jtusci.2014.11.008.
- Rivera, O., Mpodozis, C., 1994. La Megacaldera Carrizalillo y sus Calderas Anidadas: Volcanismo Sinextensional Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas Vol. I, 149-153 p.
- Rivera, O., Falcón, M., 2000. Calderas Tipo Colapso-Resurgentes del Terciario Inferior en la Pre-Cordillera de la Región de Atacama: Emplazamiento de Complejos Volcano-Plutónicos en las Cuencas Volcano-Tectónicas Extensionales Hornitos e Indio Muerto. 9° Congreso Geológico Chileno, Actas Vol. II, p. 67-71, Puerto Varas.
- Rivera, O., Mpodozis, C., 1991. Volcanismo explosivo del Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó, Región de Atacama, Chile: Las calderas Lomas Bayas y El Durazno. 6° Congreso Geológico Chileno, Actas, 213-216, Viña del Mar.
- Schmidt, R. 1981. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments of the IUGS Subcommittee on the Systematics of igneous Rocks. Geology, Vol. 9, 41-43.

Hallazgo de volcanismo efusivo mioceno en la localidad tipo de la Formación Colimapu (Aptiano-Albiano; ~34°S): Edad, Petrografía y Geoquímica

Diego Arratia¹, Marcia Muñoz-Gómez¹, Reynaldo Charrier¹⁻², Felipe Tapia³⁻⁴, Nicolás Olivares¹, María Pía Rodríguez⁵

(1) Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, Campus República, Santiago, Chile

(2) Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires, Argentina

(4) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Argentina

(5) Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

En esta contribución se presentan resultados preliminares del estudio de un depósito de lava de probable edad miocena, expuesto en el área de la quebrada La Mona, en el alto río Maipo, en la Cordillera Principal de Chile central (34°08'S, 70°04'W). Dicho depósito aflora en un sector que, según la cartografía disponible (González, 1963; Charrier, 1981), correspondería a la base de la Formación Colimapu (Aptiano-Albiano; Martínez y Osorio, 1962; Thiele, 1980), en las cercanías del techo de la Formación Lo Valdés (Titoniano-Hauteriviano; Biró, 1964; Thiele, 1980), cercano a la traza de la Falla El Diablo. Se reporta aquí una edad detrítica de ~18 Ma (U-Pb en circón) obtenida en rocas clásticas cercanas, recolectadas por Olivares (2023), en contacto concordante con la lava en cuestión, lo que asignaría estos depósitos al Mioceno. Este resultado revela la ocurrencia de volcanismo mioceno no identificado previamente en el área de estudio. En Chile central, las formaciones Abanico (Eoceno medio - Mioceno temprano; e.g. Charrier et al., 2002; Nyström et al., 2003; Kay et al., 2005) y Farellones (Mioceno; Vergara et al., 1998; Charrier et al., 2002) corresponden a los depósitos del arco Cenozoico y sus afloramientos dominan ampliamente la porción occidental de la Cordillera Principal, a más de 10 km al oeste del afloramiento del depósito de lava aquí estudiado. No obstante, la ubicación oriental de este último es coherente con hallazgos similares de volcanismo mioceno en localidades cercanas, como en el valle del río Volcán y zonas aledañas (33°50'S; Calderón, 2008; Aguirre et al., 2009; Núñez, 2018), los que además están espacialmente asociados a la Falla El Diablo. En base a la edad de los depósitos detríticos asociados a la lava, se propone que estos depósitos corresponden a sedimentos sintectónicos relacionados con la inversión de la cuenca de Abanico.

La lava foco de este estudio se está caracterizando en base a la petrografía microscópica y determinación en roca total de composición química (2 muestras; ICP-OES, ICP-MS) e isotopía de Sr-Nd (1 muestra). Según los resultados obtenidos a la fecha, ella corresponde a una andesita basáltica de dos piroxenos, con clinopiroxeno mayoritario, que contienen además plagioclasa y pseudomorfos de olivino. Es una roca porfírica, con masa fundamental traquítica, y presenta una alteración moderada a calcita, clorita y cuarzo secundario, principalmente, en espacios intersticiales, además de titanita secundaria, esmectita y trazas de epidota. Según su composición en términos de elementos mayores, presenta contenidos de SiO₂ de 55-56% (valores anhidros), y una afinidad calcoalcalina y metaluminosa. En términos de los elementos traza, se observa en los diagramas multielemento un enriquecimiento de LILE, en particular de Ba y Th, sobre HFSE y una fosa de Nb-Ta, signatures típicas de magmas de arco. Se observa también que las REE están enriquecidas respecto del condrito, con un enriquecimiento preferente relativo de las LREE sobre las HREE evidenciado en valores de la razón La/Yb entre 10 y 11. Respecto de lo reportado para las unidades cenozoicas más al oeste a esta misma latitud, estos valores son mayores que aquellos de la Formación Abanico (3-8; Kay et al., 2005) y están en el límite superior de aquellos de la Formación Farellones (3-10; Kay et al., 2005).

Palabras Clave: Mioceno, Volcanismo, Geoquímica, Petrografía, Colimapu.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT N°1210475.

Agradecimientos: Este trabajo corresponde a la memoria de Título Profesional de Geólogo del primer autor (DA) y es financiado por el proyecto FONDECYT N°1210475.

Referencias:

- Biro-Bagoczky (1964). Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, 118 p.
- Calderón (2008). Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, 117 p.
- Charrier (1981). Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, A36: 266 p.
- Charrier et al. (2002). Journal of South American Earth Sciences 15: 117-139.
- González (1963). Revista Minerales 17: 20-61. Universidad de Chile.
- Kay et al. (2005). Geological Society of America Bulletin 117: 67-88.
- Martínez & Osorio (1963). Revista Minerales 82: 28-44. Universidad de Chile.
- Núñez (2018). Tesis de pregrado, Universidad de Concepción, 178 p.
- Nyström et al. (2003). Geological Society of America Bulletin 115: 1523-1537.
- Thiele (1980). Carta Geológica de Chile 39. SERNAGEOMIN.
- Vergara et al. (1988). Journal of South American Earth Sciences 1: 199-20.

Tendencias y variaciones petrográficas y geoquímicas de las franjas intrusivas en el entorno de Putaendo (32°13'-33°S), Región de Valparaíso, Chile: Resultados preliminares

Arturo Beeche Cárdenas¹, Luisa Pinto Lincofí¹, Katja Deckart¹, Pamela Jara², Stéphanie Brichau¹⁻³, Abigail Jackson-Gain¹,
 María Pía Rodríguez⁴

- (1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla #803, Santiago Centro, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería, Las Sophoras #175, Estación Central, Santiago, Chile
 (3) Université de Toulouse, IRD, CNRS, UPS, Géosciences Environnement Toulouse (GET), F-31400 Toulouse, Toulouse, France
 (4) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu #358, Copiapó, Chile

Los Andes Centrales Sur a los ~33°S presentan un cambio en la configuración morfoestructural. Al sur de los 33°S y hasta los 40°S, presentan tres rasgos morfológicos principales, correspondientes a la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera de los Andes (Carter & Aguirre, 1965; Boyce, 2015), mientras que, hacia el norte de los 33°S, desde la Cuesta Chacabuco, dichas divisiones se vuelven menos evidentes. En los alrededores de Putaendo, se reconoce la Depresión Los Andes-San Felipe, que podría considerarse la continuación hacia el norte de la Depresión Central (Estay, 2019). Sin embargo, al norte de esta depresión local, los límites entre la Cordillera Principal y de la Costa se yuxtaponen. Además, en esta parte de los Andes, se presentan dos sistemas estructurales principales, de oeste a este con dirección norte-sur: la Falla Infiernillo y Zona de Falla Pocuro (e.g., Fock, 2005; Rivano et al., 1993) que controlaron el borde occidental de la Cordillera Principal, donde su evolución geométrica y temporal están poco acotadas. En este contexto, al norte de los 33°S, se presentan una serie de cuerpos intrusivos asignados al Cretácico y Paleoceno (Rivano et al., 1993), que diversos autores han estudiado (Rodríguez et al., 2018; Boyce et al., 2020; Parada et al., 2005), pero que debido a las diferencias latitudinales observadas en las características de estos y las interpretaciones que permiten explicarlas, aún no hay consenso respecto del contexto tectónico en el cual se habrían emplazado. Estos cuerpos se disponen en tres franjas intrusivas principales de orientación NNW-SSE, de edades decrecientes de oeste a este: a) Franja cretácica compuesta por la Superunidad Illapel; b) Franja cretácico-paleógena constituida por la Superunidad Cogotí (Unidad Fredes) y Unidad San Lorenzo; c) Franja neógena conformada por la Superunidad Río Chicharra y sus unidades pertenecientes al Mioceno (e.g., Rivano et al., 1993).

El presente estudio busca establecer tendencias y variaciones petrográficas y geoquímicas en estas franjas intrusivas, que sirvan de base para establecer sus implicancias tectónicas de emplazamiento. Para esto, el trabajo en terreno incluye la caracterización petrográfica, la aplicación de la herramienta pXRF VANTA para la obtención de datos geoquímicos in situ en primera instancia, y la toma de muestras para el análisis de los elementos químicos que componen estas rocas, en conjunto con dataciones geo- y termocronológicas de los intrusivos (U-Pb en circones, termocronología Th/He en apatitos). Además, se está realizando un cuidadoso mapeo de las unidades para establecer potenciales relaciones con los sistemas de falla presentes en la zona de estudio. Los datos geoquímicos de pXRF fueron procesados mediante los programas JupyterLab y Orange: Data Mining, para el análisis predictivo y visualización de los elementos trazas en gráficos, y así identificar los patrones o correlaciones observables para las franjas intrusivas de la zona de estudio.

Los resultados preliminares de terreno y gabinete indican que la franja occidental cretácica corresponde a cuarzodioritas, dioritas, monzonitas, tonalitas y sienogranitos de biotita y feldespato potásico, en su mayoría de texturas faneríticas; la franja central cretácico-paleocena corresponde principalmente a intrusivos hipabisales andesíticos y cuarzodioríticos e intrusivos faneríticos graníticos; la franja oriental neógena corresponde a plutones dioríticos, cuarzodioríticos y monzogranitos. Por su parte, el procesamiento de los datos geoquímicos pXRF permite destacar la franja neógena con menores concentraciones de Ca, Fe, Mg, Ti y Sr, y mayores de Si y Ba, respecto a las franjas cretácica y cretácico-paleógena. Además, los pares de elementos Sr vs. Y, Zr vs. Sr, Rb vs. Zr, Rb vs. Sr, Zr vs. Ba, y Zn vs. Sr permiten discriminar tendencias en las tres franjas, destacando la discriminación de la franja cretácico-paleógena/neógena respecto de la franja cretácica; esta última se separa en dos clusters con concentraciones bajas y altas de Rb y Zr. Estos resultados preliminares muestran que existen improntas petrológicas y geoquímicas en las franjas intrusivas estudiadas que nos permitirán discriminarlas y potencialmente establecer su significado tectono-magmático en la región de estudio.

Palabras Clave: Cordillera Principal, Depresión Los Andes-San Felipe, Emplazamiento.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt 1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: Se agradece a todo el equipo Mountain Building por la colaboración y apoyo en este proyecto, así como al apoyo en campañas de terreno a M. González y M. Navarro.

Referencias:

- Boyce, D., 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile central durante el cretácico medio-tardío: El registro estructural y sedimentario en la formación Las Chilcas. Tesis de Magister (No publicado), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 304 pp.
- Boyce, D., Charrier, R., Farías, M., 2020. The first Andean compressive tectonic phase: Sedimentologic and structural analysis of mid-Cretaceous deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39, e2019TC005825.
- Carter, W., Aguirre, L., 1965. Structural Geology of Aconcagua province and its relationship to the central Valley Graben, Chile. *Geological Society of América Bulletin* 76, 651-664.
- Estay, J., 2019. Tectónica activa en el borde occidental de la Cordillera Principal de Chile Central (29 ° -36 ° S). MSc Thesis (Unpublished) Departamento de Geología, Universidad de Chile, 181 pp.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile central entre los 33°S y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 179 pp.
- Parada, M. A., Féraud, G., Fuentes, F., Aguirre, L. A., Morata, D., & Larrondo, P., 2005. Ages and cooling history of the Early Cretaceous Caleu pluton: testimony of a switch from a rifted to a compressional continental margin in central Chile. *Journal of the Geological Society*, 162(2), pp. 273-287.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., Espíñeira, D., 1996. Hoja Quillota y Portillo, V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, N°73(1), escala 1:250.000.
- Rodríguez, M. P., Charrier, R., Brichau, S., Carretier, S., Farías, M., de Parseval, P., & Ketcham, R. A., 2018. Latitudinal and longitudinal patterns of exhumation in the Andes of north-central Chile. *Tectonics*, 37, 2863-2886.

Plutonismo Mioceno Inferior en la Cordillera Occidental de los Andes Colombianos como trazador de la reorganización de la subducción Neógena

Gladys Eliana Botello Díaz¹⁻², Astrid Siachoque Velandia², Agustín Cardona Molina²⁻³, Juan Sebastián Jaramillo Ríos¹⁻², Víctor Valencia⁴

(1) Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de Materiales y Minerales, Facultad de Minas, Medellín, Colombia

(2) Grupo de Investigación en Geología y Geofísica (EGEO), Minas, Medellín, Colombia

(3) Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de procesos y Energía, Facultad de Minas, Medellín, Colombia

(4) School of Earth and Environmental Science - Washington State University, Pullman, USA

La evolución espacial y composicional de los arcos magmáticos continentales está fuertemente controlada por la configuración y características de cada una de las placas que interactúan en la margen convergente, incluyendo el ángulo de subducción, el vector y la velocidad de convergencia, el espesor y las estructuras en la corteza continental. Como resultado, los arcos magmáticos se convierten en trazadores claves de las modificaciones tectónicas experimentadas durante la evolución de una margen convergente.

En el Cenozoico, la margen continental de los Andes Colombianos experimentó cambios en la dinámica de la subducción debido a la interacción con las placas Caribe y Nazca. Posterior a un periodo no magmático en el Eoceno Temprano, la Placa Nazca reinicia la subducción debajo la Placa Sudamericana, lo que generó la cristalización de cuerpos plutónicos poco voluminosos y composicionalmente heterogéneos durante el Mioceno inferior, los cuales intruyen el basamento volcano-sedimentario Cretácico y secuencias siliciclásticas Paleógenas a lo largo de la Cordillera Occidental de Colombia. En esta contribución se presentan nuevos datos de petrografía, geoquímica en roca total, química mineral, geocronología e isotopía Lu-Hf en circón de dos stocks ubicados en la Cordillera Occidental (Anchicayá y Pance), con el fin de trazar el carácter composicional del magmatismo formado durante la reorganización de la subducción.

Estos cuerpos magmáticos presentan edades de cristalización U-Pb en circón de 19,7 Ma y 17,2 Ma, variando entre gabro y granodiorita, con algunas facies hornblendíticas, que, en conjunto, son afines con la diferenciación de un magma máfico manto derivado.

Ambos plutones tienen firmas geoquímicas metaluminosas, predominantemente calco-alcalinas de medio a alto potasio (~1,8 K₂O wt.%), características de magmas tipo-I. Los patrones de elementos trazas evidencian anomalías negativas de Nb y Ti, enriquecimiento en LILE y empobrecimiento en HFSE, afines con ambientes de subducción, que en conjunto con los valores positivos de ε_{Hf} (+11 a +13) y las altas temperaturas magmáticas calculadas con los termómetros de piroxeno y apatito (~950°C) confirman el carácter mantélico de la fuente del magma y sugieren una influencia limitada de corteza continental antigua. La variación en las relaciones de Ba/Nb, Sr/Nd y Th/Nb sugieren contribuciones variables de deshidratación o fusión de sedimentos derivados de la placa subducente. Adicionalmente, la composición química del anfíbol presente en ambos plutones registra condiciones oxidantes (*f*_{O₂} = -8 a -10) e hidratadas (~7,7 H₂O wt.%) para la génesis del magma.

La limitada expresión areal de este magmatismo, sus características geoquímicas incluyendo el enriquecimiento en potasio y el carácter isotópico manto derivado estarían asociadas a la reinstalación de la subducción de la Placa Nazca, en las cuales, mientras la placa subducente va ganando profundidad y densidad, el flujo mantélico es aún limitado y por lo tanto la fusión de sedimentos en la lazca y la cantidad de fundido es escasa. Esto contrasta claramente con el magmatismo del Mioceno Superior el cual presenta una mayor expresión areal y su carácter composicional presenta un carácter calco-alcalino con aporte de sedimentos, lo cual es típico de una subducción más empujada y prolongada.

Palabras Clave: Magmatismo Mioceno Inferior, Geoquímica, Isotopía Lu-Hf en circón, Stock de Anchicay, Stock de Pance.

Magmatismo de arco continental en los Andes del norte durante el Paleozoico y Mesozoico: edad, composición y evolución

Camilo Bustamante¹, Agustín Cardona², Víctor Valencia³, Astrid Siachoque²

(1) Universidad EAFIT, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Medellín, Colombia

(2) Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Procesos y Energía, Medellín, Colombia

(3) Washington State University, School of the Environment, Pullman, Estados Unidos

El magmatismo de arco continental de los Andes del norte (Ecuador y Colombia), que se desarrolló durante el Jurásico, presenta los mayores volúmenes de magma emplazados en la corteza continental, al igual que su continuación hacia el sur del continente suramericano. Debido a esta intensa actividad magmática, se ha logrado obtener un conocimiento relativamente sólido sobre este tipo de magmatismo gracias al abundante registro de rocas. Sin embargo, datos recientes de campo, geocronología U-Pb y geoquímica han permitido identificar una actividad magmática que se extiende incluso desde el Carbonífero y el Pérmico, con periodos intermitentes de actividad durante el Paleozoico y Mesozoico.

Las variaciones en las composiciones isotópicas de los magmas, especialmente en las señales de Hf y Nd, han posibilitado la identificación de las variaciones en las fuentes a lo largo del tiempo. Aunque no se cuenta con suficientes datos para el Carbonífero, la información sobre los isótopos de Nd indica que este magmatismo tuvo una fuente mantélica y experimentó una asimilación variable de la corteza continental ($\epsilon\text{Nd}(i)$ entre +0,6 y +3,8: Leal-Mejía et al., 2019). Por otro lado, para el Pérmico, el magmatismo registró una mayor asimilación de la corteza continental, según se desprende del $\epsilon\text{Hf}(i)$ que varía entre -2 y +2 (Restrepo et al., 2023). Estos hallazgos concuerdan con la intrusión del magmatismo en una corteza continental heterogénea en un régimen de subducción. Durante el Triásico, por otro lado, se observan volúmenes menores de magmas a lo largo de los Andes del norte, lo que se atribuye al rompimiento del supercontinente Pangea en un régimen extensivo (Ibáñez-Mejía et al., 2020; Bustamante et al., 2023).

Para el intervalo entre el Jurásico y el Cretácico inferior, que cuenta con la mayor cantidad de datos isotópicos reportados, el magmatismo muestra una variación en la composición isotópica de Hf entre -4 y +12 (Spikings et al., 2015; Bustamante et al., 2016; Leal-Mejía et al., 2019). Esta evolución en la composición isotópica indica que a medida que el magmatismo es más joven, presenta una señal más juvenil, lo que se ha interpretado como resultado de un adelgazamiento de la corteza debido a un slab-rollback (Spikings et al., 2015) o a una modificación en la composición de la fuente de los magmas a lo largo del tiempo en un régimen de convergencia oblicua (Bustamante et al., 2016).

Además de las variaciones isotópicas, los patrones de tierras raras revelan que el magmatismo de arco continental en los Andes del norte registra cambios en los espesores corticales a lo largo del tiempo, lo cual se atribuye a variaciones en los parámetros de la subducción y a cambios en la convergencia (Chavarría et al., 2022). Asimismo, la geocronología U-Pb disponible hasta el momento ha permitido identificar picos en la actividad magmática alrededor de 280-270 Ma, 190-180 Ma y 165-155 Ma, que coinciden con periodos de engrosamiento cortical, indicado por una alta proporción de $\text{Sr}/\text{Y} > \sim 40$.

En términos generales, esto sugiere que: (1) el registro del magmatismo de arco en los Andes del norte se extiende desde el Paleozoico, (2) el Jurásico registra los mayores volúmenes de magma, intruyendo a los cuerpos magmáticos más antiguos, lo que dificulta su identificación, y (3) las variaciones isotópicas se atribuyen a la asimilación de una corteza de composición heterogénea en las rocas paleozoicas, mientras que las del Jurásico-Cretácico inferior se relacionan con variaciones en la fuente determinadas por el régimen tectónico.

Palabras Clave: Magmatismo, Arcos magmáticos, Andes del Norte.

Referencias:

- Bustamante et al. 2016, Late Jurassic to early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long-term arc maturity: *GSA Bull* 128, 1762–1779.
- Bustamante et al. 2023, Middle Triassic to Jurassic convergence at the north-western margin of Gondwana: insights from the Central Cordillera of Colombia: *Int Geol Rev*. In press.
- Chavarría et al. 2022, Quantifying crustal thickness and magmatic temperatures of the Jurassic to Early Cretaceous North-Andean arc: *Int Geol Rev* 64, 2544–2564.
- Ibáñez-Mejía et al. 2020, Tectonic juxtaposition of Triassic and Cretaceous meta-(ultra) mafic complexes in the Central Cordillera of Colombia (Medellín area) revealed by zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes, in Teixeira et al. *Geocronología e tectónica do continente Sul Americano: A contribuição de Umberto Giuseppe Cordani*, 418–443.
- Leal-Mejía et al. 2019, Spatialtemporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian andes, in Cedié, F., Shaw, R.P., eds., *Geology and Tectonics of North-western South America: Front Earth Sci*, Springer. Part IV. Chapter Vol. 5, pp. 253–254.
- Restrepo et al. 2023, Geochemistry and geochronology of the Permian arc-related magmatism at the North-western margin of Gondwana, *Geol Jour*.
- Spikings et al. 2015, The geological history of north-western South America: From Pangea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma): *Gond Res.* 27, 95–139.

Estudio de Rocas Ígneas del Arco Eoceno en los Andes de Chile Central (~34.9°S): Resultados preliminares

Fernando Carvajal Ayala¹, Marcia Muñoz-Gómez¹, Reynaldo Charrier González¹⁻², Sergio Quiñones Tapia², Felipe Tapia Silva³⁻⁴

(1) Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, República 252, Chile.

(2) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(3) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

(4) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Argentina.

Para la región de Chile Central (33°-36°S), el estudio de la evolución del margen Andino durante el Cenozoico se ha visto restringido debido a la limitada información disponible para la época Eoceno, impidiendo una adecuada reconstrucción para este tiempo. Esto es un resultado combinado de (i) escasos afloramientos eocenos reportados, y (ii) limitados estudios desarrollados en estas unidades. Los afloramientos de edad Eoceno de Chile Central han sido considerados variablemente, y en distintas regiones, como parte de la Formación Abanico (Eoceno tardío-Mioceno temprano; e.g. Flynn et al., 1995; Gana y Wall, 1997; Charrier et al., 2002) y como unidades independientes como la unidad Estratos del Cordón de Los Ratones (ECLR, ~42 Ma, 33.7°S; Sellés y Gana, 2001; Muñoz-Gómez et al., 2020). Esta última unidad se caracteriza por poseer un marcado carácter bimodal, afinidades geoquímicas de arco y una signatura relativamente juvenil (Muñoz-Gómez et al., 2020).

En este trabajo se reportan los resultados preliminares del estudio de rocas volcánicas eocenas expuestas en el curso alto del río Tinguiririca (e.g. Charrier et al. 1996; Mosolf, 2013), en la porción occidental de la Cordillera Principal de Chile Central a los 34.9°S. Esta unidad ha sido incluida en trabajos anteriores en el área dentro de la Formación Abanico (Tapia, 2015; Mosolf, 2013), pero es equivalente cronológicamente con la unidad Estratos del Cordón de Los Ratones definida a los 33.7°S (~42 Ma; Sellés y Gana, 2001; Muñoz-Gómez et al., 2020). El presente trabajo incluye el estudio de campo, caracterización petrográfica, y determinaciones radiométricas y de composición química de roca total. Se estudió una secuencia estratigráfica de ~1000 m de espesor que, en términos de la litología predominante, puede ser subdividida en tres miembros. Los miembros inferior y superior están compuestos por basaltos y andesitas de piroxeno intercaladas con tobas cristalinas y vítreas, mientras que el miembro medio está compuesto por tobas de ceniza cristalinas y vítreas, cuyos componentes líticos no sobrepasan el 30% en tobas analizadas. Una determinación radiométrica U-Pb en circon realizada en este trabajo en una toba indica una edad ~40 Ma en la parte superior de la secuencia estudiada. Un total de 7 muestras de rocas ígneas efusivas y fragmentales fueron analizadas por composición química de roca total mediante ICP-OES e ICP-MS. En términos composicionales de elementos mayores la unidad muestra una configuración bimodal con una componente básica (49%-54% de SiO₂) para las rocas efusivas y una componente dacítica (67% y 72% de SiO₂) para las rocas fragmentales. Ellas presentan un carácter subalcalino, con afinidad calcoalcalina, metaluminoso y peraluminoso. En los diagramas multielemento normalizados al N-MORB, las muestras exhiben un enriquecimiento de LILE sobre HFSE con una marcada fosa Nb-Ta, características típicas de magmas asociados a subducción. En los diagramas multielemento de REE normalizado al condrito, las muestras exhiben un enriquecimiento general con respecto a este reservorio, además de un enriquecimiento preferente de LREE respecto de las HREE. En términos globales, los patrones de REE normalizados sugieren el involucramiento de mineralogía de baja presión en la génesis de los magmas asociados, tanto en la fuente como durante el fraccionamiento, con fases como olivino, plagioclasa, y piroxeno, coherente con lo observado en la mineralogía de las rocas. El conjunto de rocas básicas muestra valores de la razón La/Yb entre 5-9, lo que está en el rango inferior de los valores definidos por las rocas básicas de la Zona Volcánica Sur de los Andes entre los 35-37°S (~40-45 km de espesor cortical; Tassara et al., 2006; Hickey-Vargas et al., 2016).

Palabras Clave: Andes de Chile Central, río Tinguiririca, Arco Eoceno, Geoquímica, Edad.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt Regular No. 1210475.

Agradecimientos: Esta investigación se enmarca en la memoria de Título Profesional de Geólogo del primer autor (Fernando Carvajal) y es financiada por el proyecto Fondecyt Regular No. 1210475.

Referencias:

- Charrier et al. (1996). *Journal of South American Earth Sciences* 9: 393-422.
- Charrier et al. (2002). *Journal of South American Earth Sciences* 15: 117-139.
- Flynn et al. (1995). *Nature* 373: 603-607.
- Gana y Wall (1997). *Revista Geológica de Chile* 24: 145-163.
- Hickey-Vargas et al. (2016). *Lithos* 258: 115-132.
- Mosolf (2013). Ph.D. Thesis. University of California.
- Muñoz-Gómez et al. (2020). *Journal of the Geological Society* 177: 258-275.
- Selles y Gana (2001). *Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, N°74*. SERNAGEOMIN.
- Tapia (2015). Tesis de Ph.D. Universidad de Chile.
- Tassara et al. (2006). *Journal of Geophysical Research* 111: 1-26.

Magmatismo y deformación a lo largo del arco del Eoceno – Oligoceno Inferior entre los 28°30'S y los 31°00'S y su contraste con el norte de los 27°S

Felipe Coloma¹, Christian Creixell¹, Andrew Tomlinson¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

En este trabajo se compila el registro de la deformación y el magmatismo del arco Eoceno-Oligoceno inferior entre los 28°30'-31°00' S, que habrían formado parte del extremo sur del Orogénico Incaico. Este segmento se compara con las características composicionales y tectónicas del orógeno y el magmatismo eoceno del norte de Chile al norte de los 27° S, caracterizado por deformación transpresiva regional (Fase Incaica) y emplazamiento de pórfidos cupríferos de clase mundial en una corteza engrosada e hidratada.

El magmatismo Eoceno-Oligoceno en la Cordillera Frontal del Norte de Chile está representado por intrusivos y en menor medida rocas volcánicas, emplazados en un régimen compresivo. Su composición es calcoalcalina, son discontinuos y están emplazados en una corteza félsica a intermedia construida principalmente durante los ciclos gondwánico y pre-andino. Las rocas eocenas más antiguas corresponden al Complejo Plutónico El Orito (54-50 Ma; 28°45'S) y las más jóvenes son las Dioritas Cuarzóferas y Tonalitas Bocatoma (39-32 Ma; 29°- 31°S). La mayor parte de estas rocas no tienen mineralización metálica asociada. El resto de las unidades intrusivas presentan edades entre 50 y 38 Ma. Entre las rocas estratificadas destacan los Estratos de Cerro el Gaucho (Eoceno) y los Estratos de la Paloma (Eoceno-Oligoceno). La geoquímica de estas rocas presenta características de una corteza no engrosada, con razones La/Yb entre 5 y 20 y razones Sm/Yb bajas, entre 1 y 4.

La deformación eocena se limita a un bloque estructural, definido hacia el O por las fallas inversas Vicuña y Rivadavia, cuya deformación principal fue datada por Emparán y Pineda en 43 Ma (K-Ar en micas) y ca. 40 Ma por trazas de fisión (Cembrano *et al.*, 2003). El núcleo paleozoico de la cordillera Frontal donde se emplazó este arco registró exhumación y alzamiento datados alrededor de los 35 Ma (Lossada *et al.*, 2017). El alzamiento del margen occidental y el núcleo paleozoico de este bloque orogénico generó depositación de discretas secuencias aluviales alrededor de los 41 Ma (p.e. Estratos de Los Cuartitos, Murillo *et al.*, 2017). Coetáneo a esta deformación y directamente al E, donde se encuentra el distrito minero El Indio, se produjo volcanismo explosivo ácido alrededor de los 35 Ma (Estratos de La Paloma, Murillo *et al.*, 2017). De modo general, la deformación eocena descrita representaría el producto de la formación de un posible relieve incaico de magnitud discreta donde luego, hacia el Mioceno, se alzó y formó la cadena montañosa de la Cordillera Frontal al sur de los 27° S.

Este estilo de deformación y magmatismo de arco contrasta significativamente con lo observado al norte de los 27° S, donde rocas ígneas eocenas presentan alzas en La/Yb y razones Sm/Yb entre 4 y 9 para rocas intermedias a máficas, lo que se interpreta como indicador de génesis de los magmas en una corteza hidratada y oxidada, engrosada tectónicamente. Coetáneo con este magmatismo, se produjo el emplazamiento de pulsos de pórfidos cupríferos entre los 42 y 32 Ma, principalmente distribuidos a lo largo del sistema de fallas de Domeyko (p.e. Escondida, Chuquicamata), donde clusters de pórfidos mineralizados se intercalan con grandes bloques estériles de basamento (Mpodozis y Cornejo, 2012). Este sistema estructural registra en gran parte la deformación incaica del área, caracterizada por rotaciones de bloques y deformación transpresiva, en respuesta a la subducción eocena. Además, diversos estudios termocronológicos indican exhumación regional para la zona entre los 50 y 30 Ma, durante la formación del relieve y orógeno Incaico.

En conclusión, el margen andino del Eoceno-Oligoceno inferior del norte de Chile registra una marcada segmentación al norte y sur de los 27° S. Por una parte, hacia el norte, se reconoce un estilo de deformación transpresiva principalmente a lo largo del sistema de fallas de Domeyko, rotaciones horarias de bloques y alzamiento de bloques de basamento y un magmatismo que sugiere un engrosamiento cortical que facilitó la génesis de sistemas mineralizados tipo pórfido cuprífero. Al sur de los 27° S, el engrosamiento cortical fue discreto, y la deformación se localizó en sistemas de fallas inversas de escama delgada (fallas Vicuña y Rivadavia) y los magmas se formaron en equilibrio con fases de baja presión en la fuente (Kay y Mpodozis, 2001) en ausencia de grandes sistemas mineralizados. Esta segmentación es el reflejo de la formación de un orógeno durante la fase Incaica, desarrollado más intensamente al norte de los 27° S, según se iba formando el codo de Arica, y con menor influencia hacia el sur, alcanzando una menor magnitud durante el Eoceno, solo generando espesores corticales importantes hacia finales del Mioceno.

Palabras Clave: Eoceno, geoquímica, magmatismo, deformación.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido posible gracias al desarrollo del Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Referencias:

- Cembrano, J.; Zentilli, M.; Grist, A.; Yáñez, G. 2003. Nuevas edades de trazas de fisión para Chile Central (30°-34°S): Implicancias en el alzamiento y exhumación de los Andes desde el Cretácico. In Congreso Geológico Chileno, N° 10, CD Rom. Concepción.
- Emparán, C.; Pineda, C. 1999. Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 12, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Kay, S.M.; Mpodozis, C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today* 11 (3): 4-9
- Lossada, A.; Giambiagi, L.; Hoke, G.; Fitzgerald, P.; Creixell, C.; Murillo, I.; Mardonez, D.; Velásquez, R.; Suriano, J. 2017. Thermochronologic evidence for late Eocene Andean Mountain building at 30°S. *Tectonics* 36 (1):2693-2713.
- Mpodozis, C.; Cornejo, P. 2012. Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. In *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: A tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of economic geologists (Hedenquist, J.; Harris, M.; Camus, F.; editors). Special publications 16: 329-360. Littleton.
- Murillo, I.; Velásquez, R.; Creixell, C. 2017. Geología de las áreas Guanta-Los Cuartitos y Paso de Vacas Heladas, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 192-193: 98 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Esquema estratigráfico del Eoceno-Mioceno Inferior en la Región del Maule. Avances para la comprensión más detallada de la Cuenca de Abanico

Juan Pablo Contreras¹, José Escribano¹, Fernando Sepúlveda Vásquez¹, Mauricio Espinoza Vargas²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

En la vertiente occidental de la Cordillera Principal de los Andes, entre los 32° y 38° de latitud Sur, se encuentran extensos afloramientos de rocas volcánicas, volcanoclásticas y subordinadamente sedimentarias que han sido asignados ampliamente a la Cuenca de Abanico (Charrier *et al.*, 2005). En la zona boreal de esta área (entre los 32° y 34°S), estas rocas se han agrupado en las formaciones Abanico y Farellones. En la zona austral, entre los 36° y 38°S, las unidades definidas son las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa, que presentan un mayor contenido sedimentario en comparación con las unidades definidas al norte. Todas esas unidades han sido interpretadas como rocas que se depositaron en cuencas de intraarco extensionales, posteriormente invertidas en un régimen compresivo (e.g. Charrier *et al.*, 2002). Previamente estas unidades han sido consideradas pares equivalentes, pero a la luz de las nuevas dataciones disponibles en las localidades tipo se evidencia que la Formación Cura-Mallín es más joven que la Formación Abanico y que la Formación Trapa-Trapa es más joven que la Formación Farellones.

Se propone un esquema estratigráfico más detallado que los publicados previamente en torno a los 35°-36°S basado en la posición estratigráfica, apoyada en 15 nuevas edades U-Pb en circón (Contreras *et al.*, 2022; Contreras *et al.*, in prep), sus relaciones de contacto y alguna particularidad litológica. La unidad inferior es la Formación Abanico (Eoceno Superior-Oligoceno), y tiene un miembro inferior de 32,2-35,5 Ma y uno superior de 26,6-22,9 Ma. La Formación Abanico que se apoya en discordancia sobre la Formación Las Chilcas (Albiano) y es cubierta por la Formación Colbún (Mioceno Inferior bajo) en relación pseudo concordante con el desarrollo de discordancias locales. La Formación Colbún tiene 22,9-20,1 Ma y está profusamente intruida por rocas subvolcánicas prácticamente contemporáneas (22,5-20,2 Ma). Sobre ambas formaciones, Abanico y Colbún, se deposita la Formación Cura-Mallín (19,9-18,2 Ma; Mioceno Inferior alto- Medio bajo) en una relación discordante en el cuadrángulo Río Claro (Venegas com. escrita). La Formación Trapa-Trapa tiene 10 Ma y se dispone discordante sobre la Formación Abanico.

Los nuevos aportes de geocronología U-Pb en circón que se han publicado (Mosolf *et al.*, 2018; Piquer *et al.*, 2017) en conjunto con los datos publicados en la Carta San Clemente-Melado (Contreras *et al.*, in prep) son un aporte importante en determinar la posición estratigráfica de las diferentes formaciones. El análisis de esta información permite interpretar que los depósitos de la cuenca de Abanico representan períodos discretos de volcanismo de 2-4 Ma, con relaciones de contactos complejas concordantes y discordantes de extensión local. Las variaciones en magnitud y expresión espacial de estos episodios volcánicos son aún un desafío, que permitirían comprender las variaciones, diaconismo y singularidades de las subcuencas.

Palabras Clave: Formación Colbún, Formación Abanico, Geocronología, Estratigrafía, Cuenca de Abanico.

Financiamiento: La información contenida en este resumen se ha generado en el marco del desarrollo de la Geología del área San Clemente-Melado (1:100.000) que es parte del programa regular de cartografía del SERNAGEOMIN. El financiamiento proviene del Plan Nacional de Geología (PNG) de esta institución.

Referencias:

- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., Muñoz, N., Wyss, A. R., Zurita, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 15(1), 117-139
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, E., Flynn, J., Iturra, I., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R. y Wyss, A. 2005. The abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie Abhandlungen*, vol. 236, 43-77.
- Contreras, J. P.; A. Encinas; M. Muñoz-Gómez; J. Escribano; Castro, D.; Vásquez, P.; Folguera, A.; Valencia, V.; Fanning, C. M. 2022. Nuevos antecedentes geocronológicos y estratigráficos de la localidad tipo de la Formación Colbún (Mioceno Inferior), Región del Maule, Chile. *Actas 21º Congreso Geológico Argentino*, 2: 553-568. Puerto Madryn.
- Contreras, J. P.; Escribano, J.; Sepúlveda, F.; De la Cruz, R. In prep. Geología del Área San Clemente-Melado, Región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Mosolf, J.; Gans, P.; Wyss, A.; Cottle, J.; Flynn, J. 2018. Late Cretaceous to Miocene volcanism, sedimentation, and upper-crustal faulting and folding in the Principal Cordillera, central Chile: Field and geochronological evidence for protracted arc volcanism and transpressive deformation. *Geological Society of America*.
- Piquer, J., Hollings, P., Rivera, O., Cooke, D., Baker, M. and Testa, F. 2017. Along-strike segmentation of the Abanico Basin, central Chile: New chronological, geochemical, and structural constraints. *Lithos*, 268-271, 174-197.

El arco magmático Gondwánico entre los 21° y 38° S: estructura regional del plutonismo y volcanismo del Carbonífero al Pérmico inferior en el norte y centro de Chile

Christian Creixell¹, Javier Alvarez¹, Juan Díaz-Alvarado², Verónica Oliveros³, Ricardo Velásquez¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile
 (2) Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España
 (3) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Chile

Las rocas intrusivas y volcánicas con edades continuas entre el Carbonífero al Pérmico representan los vestigios de un arco magmático activo durante el ciclo Gondwánico en gran parte del territorio chileno. Estas rocas se exponen como una franja continua de afloramientos en la alta cordillera de los Andes del Norte de Chile entre los 21° y 31° S, con exposiciones locales en la Cordillera de la Costa entre las mismas latitudes. Esta franja se interrumpe aproximadamente a los 31° S, y entre los 33° y 38° S, una franja continua de plutones del Carbonífero se expone a lo largo de la Cordillera de la Costa entre Concón y la Cordillera de Nahuelbuta. Al sur de los 40° S, las rocas ígneas se reconocen de manera dispersa principalmente a lo largo de la cordillera andina. Esta distribución espacial y temporal dispar de rocas ígneas en conjunto con la ocurrencia de complejos metamórficos interpretados como parte del prisma de acreción y cuencas de antearco del Carbonífero al Pérmico han llevado a la proposición de diferentes modelos tectónicos para explicar el sistema de margen de subducción activo del ciclo Gondwánico en Chile. En esta contribución estos modelos son revisados a partir de una base de datos actualizada de 284 edades U-Pb en rocas ígneas distribuidas entre los 21° y 38° S. Para efectos de simplificar la descripción del arco magmático, este se separa en tres segmentos, entre los 21° y 27° S, 27° y 31° S y 33 a 38° S.

En el segmento norte (21°-27° S) se reconocen rocas intrusivas y volcánicas con edades continuas desde el Carbonífero al Pérmico (ca. 328 a 270 Ma). Este arco magmático se emplazó en una corteza construida durante el Ordovícico (Ciclo Oclóyico) y durante una etapa de margen pasivo del Devónico. La signatura geoquímica de las rocas sugiere ausencia de engrosamiento cortical y localmente presentaría evidencias de extensión intra-arco en la Formación Collahuasi. En contraste con este segmento, aproximadamente entre los 27° y 31° S las rocas volcánicas son escasas y predominan las rocas intrusivas del Carbonífero y el Pérmico que forman el núcleo de la Cordillera Frontal. En este segmento, el Granito El Volcán (332 Ma) es el más antiguo de este arco magmático, junto a plutones reconocidos en la misma latitud en territorio argentino (Moreno *et al.*, 2020). La roca de caja de los plutones expuestos entre los 28° y 31° S corresponde a complejos metamórficos de edad silúrica a devónica, que podrían formar parte de un terreno alóctono (para-autóctono) denominado Chilenia. Una característica común entre los 21° y 31° S es la ocurrencia puntual de rocas intrusivas y volcánicas a más de 50 km hacia el oeste, con ausencia de signaturas calcoalcalinas, además de la ocurrencia de complejos metamórficos de subducción al menos entre los 25° y 31° S.

En marcado contraste con el norte de Chile, entre los 33° y 38° S se reconocen exclusivamente rocas intrusivas del Pennsylvaniano (322 a 300 Ma), las cuales intruyen a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, generando una aureola de contacto de escala kilométrica, especialmente expuesta en la Cordillera de Nahuelbuta. La distancia entre el prisma de acreción de basal al oeste y el arco magmático en este caso es de escasos kilómetros y localmente se reconocen bloques de rocas metasedimentarias de alto grado al interior del arco magmático.

La distribución temporal y espacial dispar del arco magmático al norte y sur de los 33° S ha llevado a sugerir modelos contrastantes. Por una parte, algunos autores han propuesto que el arco magmático paleozoico al sur de los 33° S estaría asociado a una anomalía térmica regional en el antearco, provocado por la subducción de una dorsal oceánica, con el fin de explicar la corta distancia entre este arco y la potencial fosa oceánica (Gianni, 2020). Por otro lado, Heredia *et al.* (2016), en base a la presencia aislada de granitos en la Cordillera de la Costa en Punta Claditas (31°30' S) han propuesto que al norte de los 31° S el arco magmático habría migrado desde la costa hacia el este entre el Carbonífero y el Pérmico. Sin embargo, este modelo se contradice con la presencia de abundante plutonismo de edades continuas entre el Carbonífero y el Pérmico ya reconocido en la Cordillera Frontal a la misma latitud. Análisis recientes de la deformación del prisma de acreción carbonífero-pérmico a diferentes latitudes (García-Sansegundo *et al.*, 2014; 2023) sugieren la existencia de un evento de deformación, con vergencia dominante al oeste, que superpone rocas de diferente grado metamórfico en el antearco, con lo cual no se descarta que la posición "anómala" del arco magmático al sur de los 33° S pueda explicarse por desplazamientos tectónicos de gran escala hacia la fosa.

Palabras Clave: arco magmático, Carbonífero, Gondwana.

Financiamiento: La base de datos geológica y geocronológica utilizada en este trabajo se deriva principalmente de los levantamientos de geología básica a escala 1:100.000 del norte de Chile, que han sido parte del Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN, además de trabajos publicados en revistas científicas por diversos autores.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Referencias:

- García-Sansegundo, J.; Farías, P.; Heredia, N.; Gallastegui, G.; Charrier, R.; Rubio-Ordoñez, A.; Cuesta, A. 2014. Structure of the Andean Palaeozoic basement in the Chilean coast at 31° 30' S: Geodynamic evolution of a subduction margin. *Journal of Iberian Geology*, 40(2): 293-308.
- García-Sansegundo, J.; Farías, P.; Gallastegui, G.; Heredia, N.; Cuesta, A.; Rubio-Ordoñez, A.; Martín-González, F.; Santos-Martínez, J.; Palape, C.; García-Moreno, O. 2023. Paleozoic gondwanan structure along the Maule river valley between Toconey and Constitución (35.4° S Chilean Pacific coast). *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104246.
- Gianni, G. 2021. The Late Paleozoic paired metamorphic belt of southern central Chile: Consequence of a near trench thermal anomaly? Preprint. DOI:10.31223/X58S4B.
- Heredia, N.; García-Sansegundo, J.; Gallastegui, G.; Farías, P.; Giacosa, R.; Giambiagi, L.; Busquets, P.; Colombo, F.; Charrier, R.; Cuesta, A.; Rubio-Ordoñez, A.; Ramos, V. 2018. Review of the geodynamic evolution of the SW margin of Gondwana preserved in the central Andes of Argentina and Chile (28°-38° S latitude). *Journal of South American Earth Sciences*, 87:87-94.
- Moreno, J.; Dahlquist, J.; Morales Camera, M.; Alasino, P.; Larrovere, M.; Basei, M.; Galindo, C.; Zandomeni, P.; Rocher, S. 2020. Geochronology, and geochemistry of the Tabaquito batholith (Frontal Cordillera, Argentina): geodynamic implications and temporal correlations in the SW Gondwana margin. *Journal of Geological Society of London*, v. 177, 455–47.

Igneous Petrogenesis of the Las Chilcas and Lo Valle Formations (~33°S): New geochemical, isotopic (Hf, Sr, Nd) and geochronologic (U-Pb) data

Vicente Gerding¹, Marcia Muñoz-Gómez², Alfonso Encinas¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Las Heras 915, Concepción, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, República 239, Santiago, Chile

The modern Andean orogen is the first order result of plate convergence in the South American continental margin. Its construction is considered to have started during the early Late Cretaceous after a regional scale compressional deformation event recorded in the region (Peruvian orogeny). However, in the central-southern region of Chile, an evolution under a compressional regime interrupted by extensional events is recognized [1,2,3,4,5]. The oldest one of these extensional events would have occurred during the Late Cretaceous - Early Paleocene, and this has been identified from scarce and local studies of the coeval arc region in the Andes of Chile-Argentina between 35°-36°S [3,5]. This could be a much larger regional scale event developed at least between 20° and 36°S [5] and would result from particular characteristics of the configuration and/or dynamics of plate convergence [3,5].

In this contribution we present the results of studies carried out in the Las Chilcas and Lo Valle Formations at ~33°S. The rocks from the Las Chilcas Formation (Albian-Campanian) records the Peruvian orogeny, whereas those from the Lo Valle Formation records the Late Cretaceous-early Paleocene arc in the region and its progressive migration eastward [6]. Both units were studied within the frame of the PhD research topic of the first author, which focuses on equivalent units between 33°-36°S. A field campaign was carried out and samples were collected between 32°50'-33°S and 70°40'-70°53' at the localities of Cuesta de Chacabuco and Llay Llay. Almost 40 samples were collected for petrographical, geochemical, isotopic, and geochronological studies.

In the study area, the Las Chilcas Formation is a 3,000 m thick continental volcano-sedimentary sequence composed predominantly of sedimentary facies, effusive volcanic intercalations and subordinate pyroclastic facies. It overlies discordantly the continental volcano-sedimentary Veta Negra Formation (Early Cretaceous) [6]. On the other hand, the Lo Valle Formation is an 1800 m thick volcano-sedimentary sequence composed predominantly of pyroclastic facies, effusive volcanic intercalations and subordinate continental sedimentary facies [7]. Both discordantly, it overlies the Las Chilcas Formation [6,8] and underlies the Abanico Formation (Oligocene) [6], which are composed of volcano-sedimentary continental deposits [6,7,8]. K-Ar and Ar-Ar geochronological determinations place the volcanism of the Lo Valle Formation in the Maastrichtian-Danian interval [6,8,9].

In the studied area, the Las Chilcas Formation is composed by up to 5-20 m thick strata of effusive and scarce explosive igneous rocks, like andesites and crystalline/vitreous ash/lapilli tuffs. The Lo Valle Formation is composed mostly by up to 10 m thick strata of explosive and comparatively scarce effusive igneous rocks. They correspond to commonly welded crystalline and vitreous ash tuffs, andesites and dacites. In addition, there is a frequent presence of interbedded olivine-rich basalts, which in previous works have been interpreted as younger Oligocene sills [7]. The studied rocks cover a wide range of silica content (49-75 SiO₂%) and show a signature typical of arc magmas, such as calc-alkaline affinity, LILE vs. HFSE enrichment (as well as LREE vs. HREE) and marked Nb-Ta depletion in multi-element diagrams. In Harker-type diagrams, patterns consistent with a common evolution dominated by the fractionation of low-pressure mineralogy (olivine, pyroxene, plagioclase) are observed.

Zircon U-Pb geochronological determinations in 4 tuffs (rhyolitic to dacitic), from the Lo Valle Formation, reveal ages between 73.1 Ma and 73.8 Ma, indicating a Campanian age for the volcanism recorded in the studied area. These rocks show juvenile $\epsilon\text{Hf}(t)$ values which range between +9.8 and +14.3 (coeval Depleted Mantle ϵHf value: +15(10)), with intra sample variations up to ~2 ϵHf units. Slightly less marked, such juvenile signatures are also recorded in whole rock Sr-Nd isotopic basis ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$: 0.7036 to 0.7040; $\epsilon\text{Nd}(t)$: +2.4 to +3.9). On the other hand, the Sr-Nd isotopic composition of 2 andesitic rocks from the Las Chilcas Formation suggest the existence of at least two magmatic families, a hypothesis currently under exploration. Such families are respectively recorded in values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ of 0.7032 and 0.7033 and $\epsilon\text{Nd}(t)$ of +6.8 and -1.7. In particular, results for the Lo Valle Formation indicate an episode of juvenile arc magmatism with negligible involvement of evolved continental crust. This episode could be favored/triggered by a scenario of thin crust and/or extensional tectonic conditions.

Palabras Clave: Southern Central Andes, Las Chilcas, Lo Valle, Geochemistry, Juvenile isotopic signature.

Financiamiento: This work is funded by ANID, Fondecyt project 1200428, and is part of the doctoral research of the Ph.D. program in Geological Sciences of the Universidad de Concepción.

Referencias:

- Charrier, R., et al. 2007. *Geol. Soc. London*, 21–114.
- Folguera, A., Ramos, V.A. 2011. *J. S.A. Earth Sci.*, 32, 531–546.
- Iannelli, S., et al. 2018. *J. S.A. Earth Sci.*, 87, 139–156.
- Mpodzis, C., Ramos, V.A. 1989. *Earth Sci. Series*, 11, 59–90.
- Muñoz, M., et al. 2018. *Tectonophysics*, 744, 93–117.
- Boyce, D. 2015. Departamento de Geología, Tesis de M. Sc. Universidad de Chile, 215 p.
- Godoy, E. 1982. III Congreso Geol. Chileno. *Actas*, 1, 124–126.
- Rivano, S., et al. 1993. SERNAGEOMIN. Carta geológica de Chile N°73.
- Gana, P., Wall, R. 1997. *Rev. Geol. Chile*, 24, 145–163.
- Vervoort, J.D., Blichert-Toft, J. 1999. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 533–556.

Silicic arc on a retreating convergent margin: an example from the Middle to Upper Triassic magmatism at High Andes (28° - 31°S)

Javiera González¹, Verónica Oliveros¹, Christian Creixell², Felipe Coloma², Ricardo Velásquez², Paulina Vásquez²

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad Geología Regional, Av. Santa María 104, Santiago, Chile

The Chollay and Piuquenes plutonic complexes represent an important part of the magmatism generated during the Lower - Middle Triassic in the western margin of Gondwana. They are exposed in the Chilean Frontal Cordillera (28°30'S - 30°30'S) and were previously interpreted as an anorogenic, post-collisional magmatism, generated by crustal anatexis during a stage in which subduction along the margin western Gondwana would have ceased (Pre-Andean Cycle, Middle Permian - Upper Triassic). In this work a field geology, petrography, whole-rock geochemistry, and mineral chemistry characterization of both complexes is carried out to establish a geotectonic context for this magmatism. These complexes are composed of rocks with a wide compositional spectrum, ranging from diorites to syenogranites, with a predominance of hololeucocratic to leucocratic monzogranites and granodiorites with calcium amphibole and biotite as mafic minerals. They correspond to subalkaline, meta to peraluminous, calc-alkaline to alkaline-calcic rocks, with a ubiquitous enrichment in LILE respect to HFSE, depressions in Nb-Ta, Ti, Sr and P, and enrichments in Pb, characteristic of subduction-related magmatism. These rocks present relatively flat REE patterns (La^N/Yb^N : 3.40 - 13.78) and the crystallization pressures calculated by Al-in-Hbl barometer from samples of the Chollay Plutonic Complex ($1.7 - 1.8 \pm 0.6$ kbar) suggest an epizonal emplacement. The isotopic composition (Sr-Nd-Pb) shows that the source of this magmatism requires the participation of a depleted mantle and not only the continental crust, discarding cortical anatexis as the main magma-generating process. This background allows us to propose that the southwestern margin of Gondwana was active, at least in this segment. These plutonic complexes were emplaced in an extensional context evidenced by the development of contemporaneous forearc and backarc basins, and the geochemical signals that allow us to evaluate a cortical decrease from the Carboniferous to the Jurassic. Therefore, this work allows us to characterize a silicic plutonism of exceptional volume generated in a retreating convergent margin and contrast it with the magmatism generated in advancing convergent margins.

Keywords: Arc-magmatism, geochemistry, SW-Gondwana.

Financing: Fondecyt 1120715; Beca Doctorado Nacional 21150502.

Acknowledgments: The authors acknowledge the collaboration of Anette Meixner in preparing the samples for subsequent analysis in TIMS.

Asimetría de las fábricas magnéticas relacionadas a la deformación sin-magmática del Complejo de Diques de Cerro Varillas, Cordillera de la Costa de Antofagasta (norte de Chile)

Pablo Gutiérrez¹⁻², **Rodrigo González T.**¹⁻³, E. Andrés Veloso⁴, Osvaldo González-Maurel⁵, Francisca Robledo⁶, Karina Luengo⁷

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Itasca Chile Spa, Avenida Pedro de Valdivia 291, Santiago, Chile

(3) Instituto Milenio en Riesgo Volcánico, Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

(4) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ciencias del Mar, Avenida Universidad 330, Curaua, Valparaíso, Chile

(5) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(6) University of Aberdeen, School of Geosciences, Kings College, AB24 3UE, Aberdeen, United Kingdom

(7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brasil

Los enjambres de diques son cuerpos plutónicos comunes en los arcos magmáticos, aún así, su relación genética con los procesos de deformación dentro del intra-arco es parcialmente conocida. El estudio de diques y enjambres de diques permite determinar la dirección de flujo y sentido de inyección del magma (e.g. Tauxe et al., 1998; Raposo et al., 2007), y si es posible, también determinar el foco o zona de alimentación del fundido (e.g. Moreira et al., 2015). El objetivo de este trabajo fue entender el origen de la geometría del enjambre de diques de Cerro Varillas (137 Ma, Cordillera de la Costa de Antofagasta), que sugiere una aparente deformación sin-magmática. Para esto se realizó un análisis microestructural y de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en los diques. El estudio de microfábrica en los diques no entregó evidencias de deformación en estado sólido posterior al emplazamiento. A su vez, milonitas de una zona de cizalle en el complejo plutónico (Uribe y Niemeyer 1984) muestran evidencias de deformación dúctil en la facies anfífolita e indicadores cinemáticos de cizalle dextral. Por otra parte, las fábricas de ASM normales son predominantes y, por lo tanto, (sub) paralelas a la magnetofábrica. La ASM se originó principalmente por la anisotropía de distribución de la magnetita intersertal que cristalizó durante la última etapa del flujo magmático. El flujo magmático subvertical a vertical se infirió a partir de la "reconstrucción" de la disposición de la foliación magnética imbricada con respecto a la orientación original de la lineación magnética (es decir, sin influencias de esfuerzos externos). El bajo grado de anisotropía, la diferente orientación de los ejes principales de AMS y la foliación magnética asimétrica de las fábricas normales oblicuas a las paredes del dique, indican un emplazamiento sintectónico del enjambre de diques bajo una tectónica extensional-dextral. Esta cinemática es, a su vez, compatible con la cinemática dextral de la zona de cizalle colindante. De esta forma, las evidencias muestran que la geometría de los diques habría sido controlada por la deformación en la zona de cizalle en condiciones sinmagmáticas, durante la construcción del complejo plutónico. Esta deformación y su cinemática puede ser relacionada al régimen de subducción de bajo esfuerzo causado por un desacople entre las placas Aluk y Sudamericana durante el Cretácico Inferior. Los resultados de este trabajo nos permiten aportar a la comprensión de la deformación de intraarco durante la construcción de la cadena magmática mesozoica en la actual Cordillera de la Costa. Además, aportamos a la comprensión del rol de las zonas de cizalle de intraarco como alimentadoras y generadoras de espacio para el emplazamiento de magma durante la construcción de los plutones graníticos, en particular en arcos magmáticos cordilleranos.

Palabras Clave: enjambres de diques, magnetofábricas asimétricas, AMS, diques sinmagmáticos, Arco Jurásico-Cretácico Inferior.

Referencias:

- Moreira, M.A., Geoffroy, L., Pozzi, J.P., 2015. Magma flow pattern in dykes of the Azores revealed by anisotropy of magnetic susceptibility. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 662–690. [doi:10.1002/2014JB010982](https://doi.org/10.1002/2014JB010982).
- Raposo, M.I.B., Ernesto, M., 1995. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction. *Phys. Earth Planet. Inter.* 87, 183–196. [doi:10.1016/0031-9201\(94\)02970-M](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)02970-M).
- Uribe, F., Niemeyer, H., 1984. Franjas miloníticas en la Cordillera de la Costa de Antofagasta (Cuadrángulo de Cerro Cristales, 24°00'–24°15'S) y la distribución del basamento precámbrico. *Andean Geol.* 23.
- Tauxe, L., Gee, J.S., Staudigel, H., 1998. Flow directions in dikes from anisotropy of magnetic susceptibility data: The bootstrap way. *J. Geophys. Res.* 103, 17775. [doi:10.1029/98JB01077](https://doi.org/10.1029/98JB01077).

Evolución de la contaminación cortical de la Cadena Volcánica del Paleoceno-Eoceno Medio en el norte de Chile (23°30'-26°S)

Karina Luengo¹, Rodrigo González², Felipe Espinoza³, Mark Fanning⁴, **Diego Jaldín**²

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Avenida Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Brasil

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(4) The Australian National University, Research School of Earth Sciences, Canberra, ACT 0200, Australia

En el antearco de los Andes Centrales se han emplazado una serie de arcos y cadenas volcánicas desde el Paleozoico Superior hasta la actualidad, distribuidos paralelos a la fosa entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Occidental. Una de estas es la cadena volcánica del Paleoceno-Eoceno Medio, emplazada en la actual Depresión Central y Cordillera de Domeyko en el norte de Chile. A pesar de que los antecedentes litológicos e isotópicos indican que los magmas que formaron la cadena derivaron del manto que se enriqueció con corteza continental durante el ascenso a la superficie, se desconoce las características de esta contaminación. Para resolver el problema se realizó un modelamiento isotópico de O-Hf en circón mediante el programa T-Igpet. Esto llevó a determinar que los miembros magmáticos iniciales corresponden al manto deprimido y la secuencia volcanosedimentaria de Fm. Quebrada Mala (Cretácico Superior), mientras que los miembros asimilados terminales son el complejo ígneo-sedimentario de la Fm. Cordón de Lila (Ordovícico) y la secuencia siliciclástica y turbidítica de la Fm. Sierra del Tigre (Devónico-Carbonífero). Además, los magmas que formaron la cadena volcánica ascendieron hasta la superficie a través de una corteza continental de ca. 35 - 40 km de espesor. Los resultados indican que el miembro inicial de las rocas del Cretácico Superior se formó a partir de una fuente de manto deprimido que asimiló de entre 10% y 30% de rocas del Ordovícico. Dicha asimilación también originó las rocas más jóvenes de la cadena, con hasta 20% de aporte desde la corteza. Por otro lado, los magmas del Cretácico Superior se acumularon en la corteza continental al nivel de las turbiditas del Devónico-Carbonífero, las cuales fueron asimiladas hasta en un 40%, por lo cuál son las rocas con valores más altos de $\delta^{18}\text{O}$. El análisis de la cadena paleocena contribuye a entender cómo se construyen los arcos y cadenas volcánicas en márgenes convergentes como el Andino.

Palabras Clave: Contaminación cortical, Modelamiento isotópico, Volcanismo, Paleoceno, Eoceno.

Agradecimientos: FONDECYT-CHILE proyecto N°11100201

Rol de las fallas y cambios en el campo de esfuerzo en la distribución y el volumen volcánico durante el Neógeno, entre los 24° y 26°S

Diego Jaldín¹⁻², Laura Giambiagi²⁻³, Silvina Guzmán⁴, Pablo Grosse⁵, Daniela Espinoza⁶, Karina Luengo⁷, Alberto Santander¹

(1) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias geológicas, Antofagasta, Chile

(2) Grupo de Tectónica, Mendoza, Argentina

(3) IANIGLA, CONICET, Mendoza, Argentina

(4) Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO), CONICET, Argentina

(5) Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina

(6) Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam, Alemania

(7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil

La evolución Andina es entendida como un complejo proceso donde interactúan episodios de deformación con sucesivos arcos magmáticos. En particular, durante el Neógeno, la evolución andina está caracterizada por la formación de nuevas fallas y por la reactivación de estructuras heredadas. Estas heterogeneidades en el arco magmático neógeno han sido descritas como fallas: (1) inversas paralelas a la trinchera, (2) transcurrentes de rumbo NW y NE; y (3) extensionales locales. Estos diferentes estilos de deformación son respuesta al campo de esfuerzo local. Sobreimpuesto a esta deformación, está el arco volcánico neógeno activo desde el Oligoceno tardío hasta la actualidad. La distribución de los centros volcánicos en esta región ha sido relacionada con heterogeneidades en la corteza superior y con cambios locales en el campo de esfuerzos. Sin embargo, a pesar de los avances en el último tiempo, aún persisten dudas sobre cómo los campos de esfuerzos activos durante el Neógeno reactivaron estructuras o formaron nuevas fallas que controlan la distribución y la cantidad de volumen erupcionado. Con el propósito de aportar a comprender estos procesos, se realizó un estudio tectono-volcánico en la Cordillera Occidental entre los 24.5° y los 26°S. Este estudio considera la integración de análisis cinemáticos, análisis dinámicos, determinación de campos de esfuerzos que controlaron el emplazamiento de centros volcánicos, estudio de la distribución del volcanismo y volumen volcánico erupcionado.

A partir de estos datos proponemos un modelo de evolución tectono-magmática caracterizado por 4 etapas: (1) etapa compresiva con $\sigma_{Hmax} = \sigma_1$ en posición E-O ($\sigma_{hmin} = \sigma_3$) caracterizada por bajo volumen volcánico, concentrado principalmente en las intersecciones de fallas NO y NE; (2) etapa de transición con $\sigma_{Hmax} = \sigma_1$ E-O y $\sigma_{hmin} = \sigma_2 / \sigma_3$, activa en el Mioceno Medio. En volcanismo está emplazado con elongaciones principales NNE a NS; (3) durante el Mioceno tardío- Plioceno temprano, σ_{Hmax} rota hasta alcanzar la posición NNO y se implanta un régimen transcurrente ($\sigma_{hmin} = \sigma_3$). Este campo de esfuerzos con una nueva dirección de σ_{Hmax} favorece la actividad de los sistemas de fallas NO. En esta etapa se alcanzó el peak de volumen erupcionado, concentrado principalmente en dirección NO; (4) Finalmente, durante el Plioceno tardío a Cuaternario, el régimen está caracterizado cambio de strike-slip a extensión ($\sigma_{Hmax} = \sigma_2$). En esta etapa el volcanismo está concentrado en dominios N-S con baja tasa eruptiva. Estos resultados evidencian que el volcanismo está controlado por la disponibilidad de magma y la interrelación entre campos de esfuerzos locales y la presencia de fallas neoformadas o heredadas.

Palabras Clave: Campo de esfuerzos, Evolución neógena, Evolución volcano-tectónica, Volumen volcánico, Plateau Andino.

High-volume ignimbrites and alkaline basalts triggered by slab-retreating and incipient delamination in the Central Volcanic zone of the Colombian Andes

Juan Sebastián Jaramillo-Ríos¹, Agustín Cardona¹, Sebastián Zapata², Víctor Valencia³

(1) Grupo de Estudios en Geología y Geofísica (EGEO), Universidad Nacional, Sede Medellín.

(2) Group of Studies in Orogenic SyStEms (GROSSE), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Rosario, Bogotá.

(3) School of Earth and Environmental Science, Washington State University.

The modern magmatic arc in the Northern Andes is mainly characterized by the occurrence of andesites-dacites with calc-alkaline, and in a minor proportion tholeiitic basalts and rhyolites. Although limited, alkaline magmatism is found in both the rear-arc and in the arc front associated with major changes in the thermal state of the mantle.

In the central volcanic zone of the Colombian Andes, there are some rhyolitic pyroclastic rocks cut by alkaline basalts. Geochronologic, whole-rock geochemistry, and isotopic analyses were carried out to understand the occurrence of these contrasting magmatic rocks in the arc front. Geochronological data suggest that the rhyolitic ignimbrites formed at 2.6 Ma are 1 Ma to 0.5 Ma older than the alkaline basalts.

The geochemistry and isotopic signatures of the ignimbrites suggest that the asthenospheric mantle is the main source of the melts that give origin to these rocks. Fractionation and crustal assimilation are also observed in the geochemistry and in the decoupling between the ϵ_{Hf} and ϵ_{Nd} , as well as in the Sr isotopes. Depleted HREE and Lu-Hf signatures suggest that these rocks were formed at high-pressure where amphibole/garnet were stable. Also, very low P and high radiogenic Pb isotopic signatures suggest that those rocks were formed in the base of a thick crust where arclogite was present and partially assimilated.

Alkaline basalts, with Ar-Ar ages between 2.1 and 1.6 Ma, correspond to basalts and picrites with $\text{Mg\#} > 60$, which could be related to primitive melts formed from an enrichment mantle source. Despite the geochemistry signatures, isotopic signatures show that the ϵ_{Nd} and Sr values are lower than those found in the ignimbrites, suggesting a different mantle source.

We relate these compositional features together with the character of the older Miocene evolution, to a Middle to Upper Miocene slab shallowing event that promotes crustal thickening and the formation of a basal continental crust like arclogites. This was followed by an Upper Miocene-Pliocene phase of slab steepening that formed the ignimbrites with isotopic characteristics of an asthenospheric mantle. After that, a restitic arclogite below the arc was foundered, promoting the lithospheric mantle melting and forming the less evolved alkaline basalts.

Keywords: Neogene Volcanism; U-Pb – Ar-Ar geochronology; Whole-rock geochemistry; Sm-Nd-Pb-Hf Isotopes.

Evidencias de la subducción de una falla transformante N50°E en las regiones de Los Ríos y La Araucanía en el Cretácico Superior, y su relación con el magmatismo de Ranquil-Loncoche-Galletué

Haroldo Lledó¹, Natalia Villa¹, Gustavo Illanes¹, Catalina Astete¹

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Centro de Investigación GeoKimún

Introducción

La distribución del magmatismo del Cretácico Superior (Coniaciano al Campaniano) entre las regiones de Los Ríos y La Araucanía está constituido por afloramientos esporádicos de rocas plutónicas e hipabisales que se inician en la Costa Chaihuín (cerca de Valdivia), continúa en el extremo oriental de la Cordillera de la Costa cerca de Loncoche, y reaparece abundantemente en la Cordillera Principal cerca de Lonquimay. Constituyendo un cinturón de afloramientos de rumbo aproximado N50°E, de al menos 270 km de largo que evidenciaría una estructura regional cuyo extremo nororiental incluiría el sistema de fallas dextrales de Mandolegüe y Chos-Malal (Folguera y Ramos, 2009), donde los autores mencionados muestran sismicidad reciente en parte de esta estructura Noreste.

En Chaihuín los afloramientos presentan la misma orientación mencionada la que es, además, idéntica a la orientación de la falla transformante Mocha que actualmente subducta bajo Sudamérica. Si bien la posición actual de la falla transformante Mocha no guarda una relación directa con el origen de esta estructura, ésta estaría relacionada con una falla transformante paralela a otra ya subductada, que sería la responsable del cinturón que conforman estos cuerpos magmáticos independientes pero sincrónicos. A continuación, exploramos las evidencias que apoyan esta hipótesis. Describimos de sur a norte (y de mar a cordillera) siguiendo la traza del cinturón de afloramientos ígneos que sigue esta orientación.

En la Costa

En Chaihuín el magmatismo ha sido profundamente estudiado por De La Fuente et al. (2021) mostrando principalmente microgranodioritas con variedades composicionales menores, desde micro-tonalitas hasta microgranitos, que intruyen al basamento metamórfico de la serie occidental. En Punta Guape estas rocas están a su vez intruidas por diques de 1 a 2 m de ancho, de orientación N75°E/80°S compuesto de andesitas basálticas megaporfídicas. Estas últimas presentan aproximadamente 10 a 20% de fenocristales de plagioclasa de más de 2 centímetros de largo, también contienen fenocristales de augita, titanomagnetita y una masa fundamental microcristalina. El contacto de bordes crenulados entre los diques megaporfídicos de Punta Guape con el plutón Chaihuín sugiere que la intrusión ocurrió cuando el plutón no estaba totalmente solidificado y, por lo tanto, se infiere una edad similar a la del plutón. En Punta Guape se observan también brechas tectónicas frágiles conformadas principalmente por bloques del gneiss del basamento Paleozoico y bloques angulosos de los cuerpos hipabisales megaporfídicos indicando que la zona estaba tectónicamente activa con un régimen frágil incluso después del emplazamiento de los diques Cretácicos.

Los diques de andesitas basálticas megaporfídicas son comunes en el Cretácico Inferior Tardío y se conoce en Chile informalmente como "ocoítas". Las "ocoítas" fueron descritas por primera vez por Thomas (1958) para el Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra en la región de Valparaíso y representan un magmatismo extensional asociado a un ambiente de trasarco las que se asocian a periodos del Jurásico y Cretácico Inferior Tardío en la zona norte y centro del país (Vergara et al., 1995; Aguirre et al., 1999). La presencia de estas rocas en la Cordillera de la Costa en Punta Guape (Comuna de Corral) es inusual, pues se ubica en el ante-arco a más de 100 km de distancia del Arco volcánico del Cretácico Superior.

Los elementos mayores de las ocoítas de Punta Guape (TTN1, TTN7 y TTN8) permiten clasificarlas en el diagrama TAS (Cox et al., 1979) como andesitas y dacitas, sin embargo, algunas de estas rocas presentan abundante mineralización de pirita, por lo que es más adecuado utilizar el diagrama Nb/Y - Zr/Ti de Winchester y Floyd (1977) para clasificar rocas alteradas, estas corresponden a andesitas-basálticas al igual que la mayoría de las "ocoítas".

Metodología

En la preparación de muestras se empleó una chancadora BICO, triturándolas a un tamaño menor a 2,5 cm, luego se cuarteó para disminuir el volumen de la masa a ¼. Posteriormente, las muestras fueron pulverizadas en un molino de bolas de óxido de aluminio, y analizadas en el laboratorio con aparato de FRX portátil Marca Bruker modelo Tracer 5, calibrado para elementos mayores y menores. La datación radiométrica U-Pb se realizó en el laboratorio de Sernageomin y la geoquímica de isótopos radiogénicos se realizó en la Universidad de Capetown Sudáfrica.

Cerca de la Depresión Intermedia

En las cercanías a Loncoche, en el límite oriental de la Cordillera de la Costa, aflora el pórfido dacítico Loncoche (De la Fuente et al., 2021), el que intruye al basamento metamórfico y tendría una geoquímica de tendencia adakítica, pero sin llegar a serlo (De la Fuente et al., 2021). Quiroz et al (2007) basándose en dos dataciones radiométricas K/Ar en biotita determina un rango de edad para este pórfido entre 72 a 87 Ma. En estas localidades también aflora el complejo metamórfico Bahía Manza, constituido mayoritariamente por esquistos pelíticos, dentro de los cuales afloran de manera discontinua bloques esporádicos de tamaños variables métricos a decamétricos de serpentinitas, que forman parte de este cinturón de afloramientos (Fig. 1) las que han sido y siguen reportándose en numerosos estudios, nosotros reportamos en este trabajo uno ubicado a 11,5 km al norte de Loncoche, y a 3.7 km al sureste de Lastarria.

Las Ocoítas de Lonquimay

Illanes (2022) describe ocoítas en la comuna de Lonquimay, región de La Araucanía, en un sector que subyacen a las rocas volcánicas Miocenas de la Formación Cura Mallín. Los análisis petrográficos y geoquímicos permiten clasificar estas ocoítas como traquibasaltos shoshoníticos, de abundantes fenocristales de plagioclasa y hematita-magnetita. Los bajos valores de Ni (<120 ppm) y Cr (<159 ppm) junto a anomalías negativas de Ti y Nb y positivas de Pb, sugieren que la fuente de estos magmas estuvo contaminada por fluidos provenientes de la deshidratación de la placa subductada. Además, las razones de Sr/Y 15, Zr/Y ~ 4 y Rb/Sr ~ 0,2, indican que las ocoítas se habrían generado en una corteza adelgazada, con bajos grados de fusión parcial y diferenciación. Los altos niveles de K en estas ocoítas indican que su formación ocurrió durante un periodo de extensión cortical en el trasarco producto de la fusión del manto litosférico, propiciado por la descompresión y aporte de fluidos de la deshidratación de la placa oceánica. Vetillas centimétricas constituidas por cuarzo, prehnita y calcita cortan a estas rocas, las que presentan además, mineralización de cobre nativo las que ocurren en asociación paragenética con la prehnita.

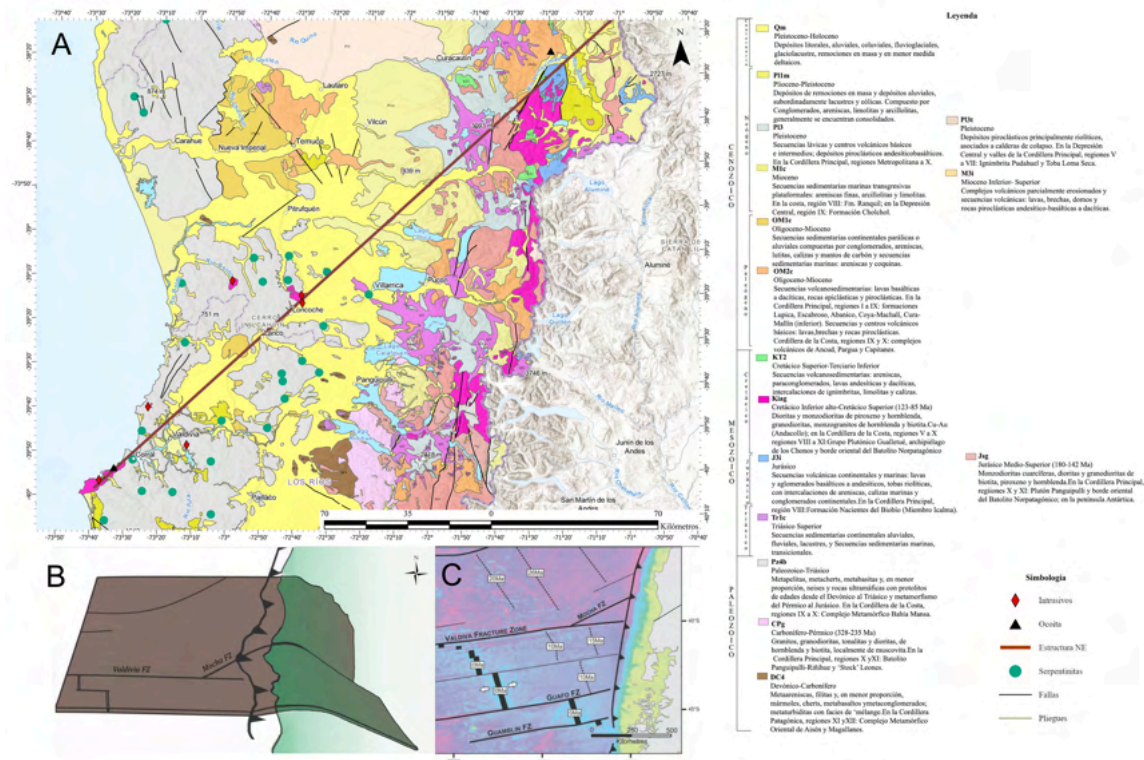


Figura 1. (A) Mapa geológico de Chile digital simplificado 1.000.000 (Sernageomin, 2003). Con puntos verdes se destaca la ubicación aproximada de las serpentinitas (Alfaro, 1980), con rombos rojos está la ubicación de los principales intrusivos descritos por De La Fuente et al (2021), y con triángulo negro las Ocoítas de este estudio. La línea de color pardo oscuro representa la estructura propuesta. (B) Esquema de la subducción mostrando el desgarro que se produce en las fallas transformantes cuando son subductadas y tienen una diferencia de edad importante a ambos lados de la falla (modificado de Pesce, 1996). En nuestro modelo la parte sur de la losa oceánica tiene un buzamiento menos pronunciado ya que es más joven que la parte norte. (C) Mapa simplificado que destaca la ubicación de las principales fallas transformante de la corteza oceánica frente a la zona sur de sudamérica (extraído de Richards & Holm, 2013).

El arco magmático Cretácico

El arco magmático Cretácico en el sur de Chile, está completamente ausente entre los 36° a 38° de latitud sur, reapareciendo en la Cordillera Principal a los 38,5°S con el Grupo Plutónico Galletué, el que continúa hacia el sur siguiendo el límite aproximado norte-sur entre Chile y Argentina hasta los 40°S donde desaparece y vuelve a reaparecer de manera casi continua desde los 41°S hasta el extremo sur de Chile. El grupo plutónico Galletué, corresponde a un Plutón compuesto por cuerpos que van desde el Cretácico Inferior Temprano (Berriasiano) al Cretácico Superior (Campaniano) (Suárez y Emparán, 1997). En base a las dataciones radiométrica K/Ar presentados por Suárez y Emparán (1997) y referencias allí citadas estas se pueden agrupar en tres subgrupos, uno Berriasiano (148 - 140 Ma, n = 2), otro Aptiano-Albiano (123,3 a 108 Ma, n = 2) y finalmente, el más voluminoso, del Cretácico Superior Turoniano-Campaniano (93,6 a 73 Ma, n = 9) al que se asocia el depósito pórfido cuprífero Galletué (Ossandón et al., 1978). Dada la gran dispersión de edades, Astete (2023) presenta una nueva datación radiométrica U/Pb en circones con el resultado de $80,1 \pm 0,3$ Ma (n = 33) en un sector que previamente había sido datado con el método K/Ar en biotita en $93,6 \pm 5$ Ma por el IIG/MMAJ/JICA (1978). A pesar de la gran diferencia en edades, no se han mapeado de manera separada estos cuerpos plutónicos debido a lo similar de sus características petrográficas y a la dificultad de acceso a los contactos dada por la cobertura de abundante de ceniza volcánica Holocena y a la exuberante vegetación. El Plutón Galletué representa el magmatismo calcoalcalino andino clásico del Cretácico y consiste principalmente de granodioritas y tonalitas, con cantidades subordinadas de granitos y monzogranitos. Astete (2023) presenta resultados de las razones de los isótopos radiogénicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7042) y $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0,5128) idénticas dentro del error analítico con las de De La Fuente et al (2021) y razones de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18,550), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15,597) y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (38,549), las que son

levemente menos radiogénicas que las presentadas por De La Fuente et al (2021). El Plutón Galletué habría sido derivado de la fusión parcial del manto con escasa contaminación cortical, sin embargo, presenta un alto grado de diferenciación magmática, producto de cristalización fraccionada. Astete (2023) estimó la profundidad del emplazamiento utilizando el geobarómetro Aluminio en Hornblenda con la calibración de Hammarstrom y Zen (1986) a partir de la química de la hornblenda obtenida con el método LIBS del equipo Hound. Astete (2023) obtuvo una presión de cristalización de 1,7 kbar la que correspondería a 5-6 km de profundidad. Además, Astete (2023) utilizó el promedio de las razones Sr/Y y La/Yb para estimar un espesor cortical de 32,9 km, dando cuenta de una corteza relativamente delgada en el Cretácico Superior.

Modelos propuestos y Discusión

Glodny et al., (2007) y De la Fuente et al., (2021) proponen que la ocurrencia de intrusivos en el antearco sería producto del paso de una dorsal meso-oceánica por la costa Valdiviana asociado a un punto triple formado por la intersección de las placas Farallón-Aluk-Sudamérica. De la Fuente et al. (2021) basa su modelo en la geoquímica y en la reorganización global de las placas tectónicas desde el quiebre de Pangea de Müller et al. (2016), donde el punto triple se habría desplazado de norte a sur desde los 120 Ma hasta el presente. Sin embargo, (Cande y Leslie, 1986) y otros autores muestran que el punto triple actual habría colisionado por primera vez a los aproximadamente 14 Ma, no antes. Tanto Müller et al. (2016) como De la Fuente et al. (2021), reconocen que la reconstrucción de las Placas tectónicas del Océano Pacífico para el Cretácico es compleja e incierta. En particular, la existencia y posición de las placas Catequil (CAT) y Chasca (CHZ) en Müller et al. (2016) entre los 120 a 90 Ma, y la súbita aparición de la Placa Aluk a los 80 Ma donde la dorsal meso-oceánica se habría desplazado hacia el norte son discutibles y no están fundamentadas con evidencias en el continente sudamericano. Los casos reconocidos de subducción de dorsales meso-oceánicas, producen una impronta en la placa suprayacente los que incluyen una compresión inicial, magmatismo bimodal, intrusiones de carácter adakítico y la aparición de basaltos alcalinos en la plataforma del retroarco, de las que hay abundantes evidencias al sur del punto triple en la Península de Taitao y en la Patagonia, pero no las hay al norte del punto triple. El escaso magmatismo del Cretácico en el antearco entre los 38,5 a 40° de Lat. Sur y su distribución en el cinturón N50°E no es compatible con la subducción de una dorsal meso-oceánica en el Cretácico.

Por otra parte, Richards y Holm (2013) proponen que la subducción de fallas transformantes pueden relacionarse a la génesis de grandes sistemas de pórfidos cupríferos en la corteza continental suprayacente debido a que las zonas transformantes permiten la transferencia de calor y liberación de fluidos por ventanas astenosféricas delgadas y alargadas lo que permite formar magmas con tendencias adakíticas a las que se pueden asociar los grandes pórfidos. La placa de Nazca contiene numerosas fallas transformantes que actualmente se están subduciendo. La posición de la falla transformante Mocha ha migrado de norte a sur desde al menos el Mioceno Inferior hasta su posición actual, la que habría generado a su paso pórfidos cada vez más jóvenes hacia el sur (Richards y Holm 2013). Sin embargo, la edad y posición actual de la falla transformante Mocha, no es la responsable directa del lineamiento del magmatismo Cretácico Superior (Santoniano- Campaniano), sino que habría sido una falla transformante más antigua, paralela a la falla Mocha, que se habría completamente subducido. La subducción de una falla transformante, permite explicar de mejor manera el magmatismo acotado, con las mismas características geoquímicas, y la presencia de las serpentinitas como desgarros en el cinturón NE.

Conclusiones

La distribución alineada del magmatismo del Cretácico Superior desde el ante-arco en la Costa de la comuna de Corral hasta el arco en la Cordillera Principal en la comuna de Lonquimay es consistente con la subducción de una falla transformante antigua, paralela a la falla transformante Mocha. La subducción de fallas transformantes oceánicas son un mecanismo viable para explicar la presencia de ventanas astenosféricas angostas y elongadas que explica satisfactoriamente el magmatismo de ante arco acotado y estructuralmente orientado del Cretácico Superior en las regiones de Los Ríos y La Araucanía, así como la presencia de serpentinitas, sin la necesidad de involucrar la subducción de dorsales meso-oceánicas, de las cuales sólo hay evidencias al sur del punto triple en la Península de Taitao.

Palabras Clave: Falla, Transformante, Subducción, Antearco, magmatismo.

Agradecimientos: Al Proyecto Fondecup EQM180173 y al revisor anónimo que mejoró la calidad de este manuscrito.

Referencias:

- Aguirre et al., 1999. Time interval between volcanism and burial metamorphism and rate of basin subsidence in a Cretaceous Andean extensional basin. *Tectonophysics* 313, 433-447.
- Astete, 2023. Petrología y geoquímica de los plutones Galletué y Melipeuco... *Mem.Geol.UCT*. Cande y Leslie, 1986. Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *J.Geoph.Res.* 91 B1, 471-496.
- De la Fuente et al., 2021. Upper Cretaceous intrusives in the Coastal Cordillera near Valdivia: forearc magmatism related to the passage of a triple junction? *Andean Geology* 48 (1) 24-53.
- Folguera y Ramos, 2009. Collision of the Mocha fracture zone and a <4 Ma old wave of orogenic uplift in the Andes (36°-38°S). *Lithosph* 1 (6).
- Glodny et al., 2007. Mesozoic to Quaternary continental margin dynamics in South-Central Chile (36-42°S): the apatite and zircon fission track perspective. [doi:10.1007/s00531-007-0203-1](https://doi.org/10.1007/s00531-007-0203-1).
- Illanes, 2022. Hallazgo de ocoitas con mineralización de cobre en Lonquimay... *Mem.Geol.UCT*
- Müller et al., 2016. Ocean Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup. [doi:10.1146/annurev-earth-060115-012211](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012211).
- Ossandón et al., 1978. El prospecto cuprífero Galletué-Un pórfido cuprífero en la p. de Malleco... *Rev. Geol.de Chile* 5, 33-48.
- Quiroz et al., 2007. Geología del Área Lanco-Loncoche. Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. *Sernageomin, Carta Geol.de Chile, S.Geol.Básica* 106.
- Richards y Holm, 2013. Tectonic preconditioning and the formation of giant porphyry deposits. *Econ.Geol.sp.Pub.* 17, 265-275. Suárez y Emparán, 1997. Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío. *Sernageomin. Carta Geol.de Chile*, 71.
- Thomas, 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de la Ligua y la cuesta Barriga. *IIG, Chile*.
- Vergara et al., 1995. Jurassic and Early Cretaceous Island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. *Geol.Soc.of Am.Bull.* 107, 1427-1440.

Arquitectura y evolución del Sistema Volcánico Leonera – El Plomo desarrollado durante el Mioceno en Chile central (33°14' S), localidad de Farellones, Santiago, Chile

Martin Meyer Fontirroig¹, Ítalo Payacán Payacán¹, Rodrigo Quiroga Carrasco², Javier Reyes Vizcarra¹, Camila Leiva Gilberto³, John Browning³⁻⁴

(1) Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Santiago (Chile).

(2) CONICET, Grupo de Tectónica, IANIGLA, CCT Mendoza.

(3) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile

(4) Departamento de Ingeniería de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile

El volcanismo Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile central (33°10'S–33°21'S) se caracteriza por extensas sucesiones de rocas volcánicas y volcanoclásticas expuestas en la alta cordillera de Santiago, las cuales evidencian cambios en los estilos eruptivos y paisajes volcánicos que dominaron la evolución geológica entre el Eoceno – Mioceno. Estas rocas se agrupan en la Formación Abanico (Eoceno Medio–Mioceno Inferior) y Formación Farellones (Mioceno Inferior–Mioceno Superior), ambas con diversos estudios enfocados en su origen y evolución magmática-estructural. Sin embargo, salvo algunos estudios recientes, no existe una caracterización detallada de las morfologías volcánicas y estilos eruptivos registrados en dicho período.

Esta contribución busca identificar procesos magmáticos de edades coetáneas para reconstruir la arquitectura de los sistemas volcánicos en el cordón Cerro Pintor, Leonera y El Plomo, en el sector de Farellones, mediante nuevos antecedentes estratigráficos, relaciones de contacto, variaciones litológicas y petrográficas. Se levantó información de ~3.400 metros de columnas estratigráficas, que permitieron identificar cuatro miembros, en virtud de discontinuidades, variaciones de facies y morfologías volcánicas. De base a techo, estos son: (1) Miembro Vizcacha, con litologías principalmente piroclásticas de tipo bloque y ceniza, tobas de lapilli y ocasionales lavas dacíticas, subhorizontales; (2) Miembro Puma, con litologías piroclásticas que varían de brechas a tobas de lapilli periclinales y potentes coladas andesíticas e intruidos por filones andesíticos; (3) Miembro Águila, compuesto por domos riolíticos (con presencia de esferulitas en sus márgenes) y brechas piroclásticas monomíticas riolíticas, relacionadas a colapsos de domos en la cercanía de centros de emisión, y (4) Miembro Cóndor, compuesto principalmente por coladas andesíticas a andesíticas basálticas y ocasionales intercalaciones sedimentarias y piroclásticas como tobas de lapilli y brechas dacíticas.

A partir de las observaciones, complementados con datos geocronológicos de trabajos previos, se sugiere una evolución del sistema volcánico según:

- Una primera etapa, con predominancia de eventos eruptivos violentos, los que propiciaron la formación de extensas sucesiones piroclásticas e ignimbríticas en la base de la columna (Miembro Vizcacha), posiblemente volcanismo de tipo caldera.
- Una segunda etapa, representa la construcción de un edificio volcánico compuesto (Miembro Puma), desarrollado por erupciones explosivas y efusivas que depositaron de forma periclinar extensas intercalaciones de brechas piroclásticas y coladas de lava dacíticas hasta andesíticas.
- La siguiente etapa del volcanismo, registra episodios de efusividad y formación de exodomo y criptodomo (Miembro Águila), con diversos centros eruptivos discretos distribuidos en el área de estudio. Dicho período de volcanismo efusivo silíceo está intercalado por episodios acotados de eventos explosivos expresados en flujos de bloque y ceniza (colapso de domos), corrientes de densidad piroclástica y depósitos de caída.
- Finalmente, hacia el techo de la columna (Miembro Cóndor), se retorna a un volcanismo intermedio/básico, con extensas sucesiones de coladas de andesitas basálticas de piroxeno a andesitas de piroxeno, porfíricas, con ocasionales niveles piroclásticos y sedimentarios grano decrecientes.

Esta última etapa se puede interpretar como registro de un volcán compuesto (estratovolcán), cuyos relictos serían los cerros El Plomo y Leonera. En las zonas centrales, se observa una serie de diques andesíticos que intruyen las rocas volcánicas, junto con una alteración argílica propia de las partes internas de los volcanes compuestos. Adicionalmente, tanto en las zonas cercanas a la cumbre como en la base de los cerros El Plomo y Leonera, se registran relictos de manifestaciones geotermiales. Aquí se propone que, en la base del cerro La Leonera, la transición entre la unidad riolítica (M. Águila) y andesítica superior (M. Cóndor), habría servido como trampa de fluidos hidrotermales que produjeron una zona de intensa alteración.

Este estudio muestra que las cumbres del cerro Leonera y El Plomo registran la evolución de un sistema volcánico que tuvo una historia eruptiva compleja en términos de estilo eruptivo y composición de sus productos, el cual sobresalía como un alto topográfico importante durante el desarrollo del relieve Mioceno medio–superior en Chile central. Esto es consistente con el registro en otras altas cumbres en este segmento de los Andes, tal como el cerro Aconcagua, lo que sustenta la idea de que, en Chile central, el volcanismo caracterizado por la construcción de grandes volcanes compuestos data al menos desde el Mioceno.

Palabras Clave: Volcanismo Cenozoico, Formación Farellones, Morfologías Volcánicas, Volcán Compuesto.

Financiamiento: proyecto FONDECYT regular N°1180577.

Agradecimientos: al financiamiento entregado por el proyecto FONDECYT regular N°1180577, a cargo del Dr. Francisco Gutiérrez. Como también, el apoyo de la Escuela de Geología de la Universidad Mayor.

Referencias:

- Aguirre, L., Robinson, D., Bevins, R. E., Morata, D., Vergara, M., Fonseca, E. & Carrasco, J. 2000. A low-grade metamorphic model for the Miocene volcanic sequences in the Andes of central Chile. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 43, 83–93.
- Beccar, I., Vergara, M. y Munizaga, F. 1986. Edades K-Ar de la Formación Farellones en el Cordón del cerro La Parva, Cordillera de los Andes de Santiago, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Nos. 28-29, p. 109-113.
- Fariás, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C. Tassara, A., Tapia, F. & Fock, A., 2010. Crustal scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean Mountain building. *Tectonics*, Vol. (29), TC3006.
- Godoy, E., Harrington, R., Fierstein, J. & Drake, R. 1988. El Aconcagua, ¿Parte de un Volcán Mioceno? *Revista Geológica de Chile*, Vol. 75. No. 2. p. 767-772.
- Munizaga, F. y Vicente, J.C. 1982. Acerca de la zonación plutónica y del volcanismo miocénico en los Andes de Aconcagua (La. 32-33°S): Datos radiométricos K-Ar. *Revista Geológica de Chile*, No. 16, p. 3-21.
- Nyström, J. O., Vergara, M., Morata, D. & Levi, B. 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15p–33°45pS). *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1523–1537.
- Quiroga, R. 2013. Análisis estructural de los depósitos cenozoicos de la cordillera Principal entre el cerro Provincia y el cordón el Quempo, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25'S). Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Piquer, J., Yáñez, G., Rivera, O. & Cooke, D. 2019. Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. *Andean Geology* 46 (2): 223-239.
- Santibáñez, S. (2021). Emplazamiento y procesos de diferenciación magmática registrados en el Stock Yerba Loca, los Andes de Chile Central (33.30-33.32°S) (memoria de título). Universidad Mayor, Santiago.

Crustal and Subcrustal Magmatic Components of Cenozoic Andean Arc Magmas in Central Chile (32°45'-34°30'S)

Marcia A. Muñoz-Gómez¹, C. Mark Fanning², Ítalo Payacán³, Felipe Tapia⁴⁻⁵, Reynaldo Charrier⁶

(1) Universidad Andres Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Campus República, Santiago, Chile

(2) Australian National University, Research School of Earth Sciences, Canberra, Australia

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Santiago, Chile

(4) Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina

(5) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Buenos Aires, Argentina

(6) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

In Central Chile (32°45'-34°30'S) there is a protracted Cenozoic arc magmatic activity that developed almost uninterruptedly between, at least, the middle Eocene and up to the present. This is recorded in extensive continental and mainly volcanic deposits, intrusive units, and the current volcanics which are widely distributed from the axis of the main Andes Cordillera to the west up to the eastern portion of the Central Depression. The evolution of the margin throughout this period was initially framed by an extensional event, between (middle Eocene?) Oligocene - early Miocene, characterized by an intra-arc rift system developed over a thin crust (~35 km; Charrier et al., 2002; Nyström et al., 2003; Kay et al., 2005). The system was then inverted in the early Miocene under a compressional regime that was active until today and responsible for the constructional processes of the modern Andes in the region (e.g. Giambiagi & Ramos, 2002; Farías et al., 2010). Overall, arc igneous rocks associated with this evolution show compositional variations that are marked by an increasing crustal signal, with a progressive migration of the magmatic loci to the east, from the westernmost Oligocene frontal arc deposits (current Central Depression) up to the Holocene active arc axis (Andean drainage divide, ~80 km in current distance; Charrier et al., 2002; Nyström et al., 2003; Kay et al., 2005).

Along with new determinations presented herein, the numerous studies developed in Central Chile in the last decades provide an extensive compositional characterization of Cenozoic arc magmas in terms of whole rock geochemistry and Sr, Nd, Hf and O isotopic compositions. This allows for a comprehensive interpretation of the major magmatic components, the crustal vs subcrustal sources, and the dynamic variations recorded throughout the evolution of the Andean margin. Four major components involved in the magma genesis of this arc segment have been identified: (i) the subcrustal Subduction Modified Depleted Mantle, which sources the juvenile arc magmatic additions prompting extensive MASH-type magmatic processes in the deep continental crust, (ii) a crustal Deep Evolved Component, here ascribed to the Cuyania terrane Grenvillian basement, (iii) a Juvenile Low- $\delta^{18}\text{O}$ Component, which likely corresponds to an oceanic crust type domain located deep within the continental crust, and (iv) a Late Paleozoic - Early Triassic Component, like the Frontal Cordillera crystalline basement, located at medium to upper crustal levels underneath the Mesozoic cover of the main Andes Cordillera in this region. The influence of these components is variable depending on the time and location of the arc magmatic units. In order to evaluate their relative contributions, geochemical models are being tested based on thermodynamic simulations of mineral phase equilibrium, melt compositions and isotope partitioning models. Overall, the composition of Cenozoic arc magmas in Central Chile is strongly controlled by the continental crust, both after (i) the constitution and architecture of this domain and its reshaping throughout the evolution of the Andean margin and by (ii) the governing tectonic regime.

Keywords: Cenozoic Andean Arc, Central Chile, Magmatic Components, Arc Sources.

Financing: This work was supported by the ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, Chile) under the grants ANILLO-ACT18, FONDECYT 1120272, and PAI79160139.

References:

- Charrier et al. (2002). *Journal of South American Earth Sciences* 15: 117-139.
- Nyström et al. (2003). *Geological Society of America Bulletin* 115: 1523-1537.
- Kay et al. (2005). *Geological Society of America Bulletin* 117: 67-88.
- Giambiagi et al. (2002). *Journal of South American Earth Sciences* 15: 101-116.
- Farías et al. (2010). *Tectonics* 29: TC3006.

Petrografía de las Metadioritas de Bolfín-Punta Tetas y las Ortogranulitas de Cabo Jara, Antofagasta, Chile

Paulina Olivares Sáez¹⁻³, Rodrigo González Tapia¹⁻³, Verónica Oliveros Clavijo²⁻³, Christopher López Aguilera¹

(1) Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

En la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa de Antofagasta afloran las Ortogranulitas de Cabo Jara y las Metadioritas de Bolfín-Punta Tetas, ambas de protolito ígneo y edad Jurásico Inferior-Medio. Las ortogranulitas presentan una fábrica magmática con foliación metamórfica sobrepuesta definida por la orientación preferencial de cristales de plagioclasa y piroxeno. Las texturas magmáticas se encuentran parcialmente obliteradas por texturas granoblásticas formadas por cristales de plagioclasa y piroxenos recristalizados. Lucassen y Franz (1996) a partir de núcleos cálcicos en plagioclasas (An_{70-90}) sugirieron un protolito gábrico. Se interpretaron edades en roca total en isocronas Sm-Nd de 171-150 Ma para documentar un metamorfismo de edad Jurásico tardío. Por otra parte, las metadioritas corresponden a rocas con una fábrica ígnea fuertemente foliada y su protolito de composición diorítico se preserva en los sectores menos anfibolitizados, principalmente en las inmediaciones de los gabros del Cerro Coloso (Gonzalez y Niemeyer, 2005). El objetivo de este trabajo es entregar resultados preliminares acerca de la petrografía de las Metadioritas de Bolfín Punta Tetas y las Ortogranulitas de Cabo Jara con el fin de interpretar sus diferencias petrogenéticas (condiciones y tipo de metamorfismo) para comprender los procesos profundos en el arco magmático y contextualizarlos con la evolución geodinámica del Jurásico. Ambas unidades están expuestas en dos afloramientos, uno en la Península de Mejillones, y otro en Cabo Jara al sur de Antofagasta, sin embargo, se desconoce si las paragénesis metamórficas en ambos afloramientos son equivalentes. Para comparar la petrografía (fábrica y mineralogía) de cada tipo de roca en ambos afloramientos se recolectaron muestras que fueron descritas macro y microscópicamente para su posterior análisis mineralógico mediante un microscopio de barrido electrónico QEMSCAN®. Los resultados preliminares muestran que las ortogranulitas están conformadas por piroxeno, plagioclasa y granate y, además, presentan un metamorfismo retrógrado con anfibolitización en nódulos y planos regulares. En el bloque norte de Bolfín se reconocieron dioritas milonitizadas y en el bloque sur milonitas con enclaves ultramáficos. Debido al metamorfismo de las facies granulita y anfibolita de estas rocas, se hipotetiza que las Ortogranulitas de Cabo Jara y las Metadioritas de Bolfín- Punta Tetas representan diferentes niveles corticales pertenecientes a la raíz del arco jurásico. Los resultados de este trabajo muestran que los niveles corticales profundos expuestos en la Cordillera de la Costa no serían equivalentes para todos los afloramientos de rocas metamórficas de alto grado del basamento.

Palabras Clave: Ortogranulitas, metadioritas, metamorfismo de alto grado, petrografía.

Financiamiento: Esta investigación fue realizada y patrocinada por el Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, el cual es financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través de la Iniciativa Científica Milenio, código proyecto ICN2021_038.

Agradecimientos: Agradecimientos a la Unidad de Equipamiento Científico MAINI® de la Universidad Católica del Norte por el uso del QEMSCAN, Convenio Cia Minera Cerro Colorado-UCN 2007-2013.

Referencias:

- Lucassen, F., & Franz, G. (1996). Magmatic arc metamorphism: petrology and temperature history of metabasic rocks in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(2), 249-265.
- González, G. & Niemeyer, H. (2005). Cartas Antofagasta y Punta Tetas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 89, 35 p., 1 mapa escala 1:100.000.

The Pre- and Early Andean granitoids of the SW Gondwana convergent margin (Chile-Argentina, 20°-40°S)

Verónica Oliveros¹⁻², Paulina Vásquez³, Christian Creixell³, Javiera González¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad Geología Regional, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

The pre-Andean and Early-Andean evolution of the southwestern Gondwana margin comprises three stages: the Gondwana cycle (Late Carboniferous-Early Permian), the Pre-Andean stage (Middle Permian-Late Triassic) and the Early Andean cycle (Early Jurassic-Early Cretaceous). These stages have been traditionally interpreted as the upper crustal response to major changes in the tectonic setting: Cordilleran-style continental arc (Gondwana cycle), followed by orogenic collapse and possibly slab break-off that led to continental rifting and extensive crustal melting (Pre-Andean stage), and subsequent subduction re-initiation in oceanic arc-style context (Early Andean cycle). However, recent geological, geochronological, geochemical and petrological data for the Carboniferous to Jurassic igneous rocks suggest that subduction was the most likely process by which the magmatic record was generated. Sub-alkaline affinities, LILE enrichment over HFSE, Nb-Ta troughs, porphyritic textures and hornblende- and biotite-bearing lithologies are present in all studied units, whereas Sr-Nd-Pb isotopes suggest that magma sources are a mixture of depleted mantle and variable contribution from the continental crust. Chemical evolution in the magmatic record points to a decline in the contribution of crustal or lithospheric sources to the magmatism with time. Thus, SiO₂, La/Yb and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr₀ exhibit a systematic decrease from the middle Permian to the Jurassic, whereas the initial εNd of the igneous rocks increases in the same period.

The geological record in the same period suggest that these changes were accompanied by the shift from dominant compressional (Carboniferous-Early Permian) to transtensional deformation (Middle Permian-Jurassic) in the upper crust with the convergent margin transitioning from advancing to retreating. Slab roll-back during the Late Permian to Triassic may have induced extension in the upper crust and lithospheric loss as a consequence of delamination or thermal erosion.

At ca. 215-210 Ma, the magmatic loci advanced trenchward at least 150 km, establishing the new arc front in the present-day Coastal Cordillera, where it stayed during the Jurassic and Early Cretaceous. This trenchward shift in the arc location that marks the initiation of the Early Andean arc in Chile, may have been a continental-scale process but its causes remain unknown. The margin did not witness significant changes in the tectonic stress, maintaining its transtensional character from Late Triassic to Jurassic. However, the composition of the Pre-Andean intrusions differs from the Early Andean granitic rocks, with tonalite-granodiorite-monzogranite (M<15) in the former and dominant quartz diorite-tonalite-granodiorite lithologies (M>15) in the latter. These different compositional trends are perhaps due to distinct thickness or composition of the crust in with each arc emplaced.

Keywords: Andes, Triassic, retreating margin, batholiths, subduction.

Financing: Fondecyt 1120715Plan Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología.

Acknowledgments: ANID-Fondecyt. Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, Universidad de Concepción.

The relative contribution of mantle and crustal sources to primitive arc magmas from the Early Palaeozoic Famatinian - Puna arc

Juan Enrique Otamendi¹

(1) Universidad Nacional de Río Cuarto, Geología - ICBA - CONICET, Ciencias Exactas Físico Químicas y Naturales, X5804BYA Campus Universitario, Río Cuarto, Argentina

This contribution used the composition of primitive mafic rocks within an ancient Early Palaeozoic subduction-related magmatic arc to assess the petrological processes involved in cycling chemical elements from the Earth's surface through the slab and mantle reservoirs to the crustal arc magmatic systems. Based on published data, I compiled geochemical data from mafic and ultramafic rocks, ranging from deep crustal cumulates and plutonic rocks to shallow crustal sub-volcanic and volcanic rocks taken stretching along the Early Ordovician Famatinian-Puna paleo-arc axis between latitudes 22° and 33° South. A total of about 200 data of bulk mafic and ultramafic composition were filtered to identify the mafic rocks better corresponding to primitive arc melts. The chosen selection criteria were: 1) MgO that varies between 8.0 and 12.5 wt%, with SiO₂ ranging from 47.5 to 52.5% and TiO₂ < 1.5%; 2) in addition the molar MgO/MgO+FeO* ratio > 0.55; 3) the concentration of Ni between 90 and 270 ppm and that of Cr < 1700 ppm; 4) the Eu anomaly measured as Eu^N/Eu* between 0.7 and 1.3 (where Eu* = (Sm^N × Gd^N)^{1/2}, an N denote normalized to chondrite) has to be neutral and a Dy^N/Gd^N ratio < 1.5. Together, these criteria eliminate rocks that have experienced extended early crystal fractional crystallization or are liquid-rich differentiated. Using the filtered population, I found that 35 rocks correspond to primitive melt compositions (Kelemen et al., 2003; Schmidt and Jagoutz, 2017). For the primitive mafic rocks, I conducted inverse modelling techniques utilizing the composition of primitive mafic rocks that allowed estimating the composition of the ambient mantle source, which appears to be largely depleted (Mc Dade et al., 2003; König et al., 2010). The inverse approach suggests that fluid-mobile elements (Th, U, La, and Sr) originate primarily from the slab contribution. In contrast, the background asthenospheric mantle sourced the budget of high field strength elements (HFSE) such as Nb, Ta, Ti, Zr, Hf, and Y, and heavy rare earth elements (HREE) to sub-arc mantle source. Furthermore, forward modelling is limited by the incomplete preservation of ancient volcanic arc geology. The forward mixing models that consider the interaction between slab-released sediment-derived melts and the ambient depleted mantle can explain the observed variations in Nd and Sr isotopic ratios in primitive mafic rocks (Straub et al., 2010; Jacques et al., 2014; among others). By introducing a small mass fraction (≤1.5%) of average Cambrian continental sediments subducted beneath the Early Ordovician arc into a MORB-depleted mantle source, the parental primitive mafic magmas display the abundance of sedimentary-supplied elements such as Th, La, and Ba, as well as radiogenic isotope ratios of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴N and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. The chemical and isotopic composition of deep-seated primitive mafic rocks reveals a decoupling between incompatible trace elements, which shows minimal variation, and radiogenic isotopic ratios, which exhibit a wide range and reflect contributions from crustal reservoirs. But, a simple model involving simultaneous bulk assimilation (A) and imperfect fractional crystallization (IFC) in an open igneous system provides a conceptual framework that account for the observed variations in trace elements and isotopes, where crystal accumulation and assimilation occur concurrently (Nishimura, 2012). Importantly, a calculated of about 10% mass fraction input of deep crustal contamination with supracrustal host rocks that entered into the deep crustal magmas can obscure the expected clear signature of sub-arc mantle petrological processes. Although, the chemical and isotopic compositions of arc lavas offer a unique opportunity to evaluate contributions from multiple sources within subduction zones, distinguishing between two potential reservoirs contributing pre-arc continental crust to the subduction factory can complicate the interpretation of geochemical signatures observed in volcanic rocks, apart from intra-oceanic volcanic arcs. In conclusion, the assessment of the Famatinian-Puna arc, an ancient subduction zone, aligns with estimates from active volcanic arcs, underscoring the general applicability of these findings to subduction zone magmatism.

Keywords: arc magmas, continental crust, subduction cycle, Famatinian arc, Ordovician.

Financing: FONCYT-Argentina grants PICT2019-0056 and PICT2021-0055 .

Acknowledgments: I acknowledge for discussions, fieldwork, and analytical work to M.P. Armas, M. Barzola, G. Camilletti, E. Cristofolini, F. Escribano, Andrea Galli, A. Morosini, S. Oriolo, and A. Tibaldi.

References:

- Jacques, G., Hoernle, K., Gill, J., Wehrmann, H., Bindeman, I., Lara, L.E. 2014. Geochemical variations in the Central Southern Volcanic Zone, Chile (38–43 S): the role of fluids in generating arc magmas. *Chemical Geology*, 371, 27–45.
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K., Greene, A.R., 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry* 3, 659.
- König, S., Münker, C., Schuth, S., Luguet, A., Hoffmann, J.E., Kuduon, J. 2010. Boninites as windows into trace element mobility in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2), 684–704.
- McDade, P., Blundy, J.D., Wood, B.J. 2003. Trace element partitioning between mantle wedge peridotite and hydrous MgO-rich melt. *American Mineralogist*, 88(11–12), 1825–1831.
- Nishimura, K. 2012. A mathematical model of trace element and isotopic behavior during simultaneous assimilation and imperfect fractional crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164, 427–440.
- Schmidt, M.W., Jagoutz, O. 2017. The global systematics of primitive arc melts. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 18(8), 2817–2854.
- Straub, S.M., Goldstein, S.L., Class, C., Schmidt, A., Gomez-Tuena, A. 2010. Slab and mantle controls on the Sr–Nd–Pb–Hf isotope evolution of the post 42 Ma Izu–Bonin volcanic arc. *Journal of Petrology*, 51(5), 993–1026.

Magmatismo del arco frontal Oligoceno-Mioceno entre los 34°-35°S: Petrogénesis e implicancias tectónicas

Sergio Quiñones¹, Marcia Muñoz-Gómez², Reynaldo Charrier¹⁻²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, República 252, Santiago, Chile

En esta contribución se presentan resultados preliminares de la caracterización petrográfica y geoquímica de los productos ígneos del arco Oligoceno-Mioceno entre los 34°-35°S, en el piedemonte occidental de la Cordillera Principal. En esta zona se ha estudiado una secuencia estratigráfica que alcanza ~1.400 m de espesor para la cual se han reportado edades de entre 25 y 20 Ma (Contreras y Schilling, 2021). Dicha secuencia exhibe, de base a techo, una variación de la litología que va desde (i) basaltos y andesitas a (ii) basaltos y andesitas con intercalaciones de tobas además de areniscas y conglomerados subordinados. En este trabajo, a la fecha se han analizado un total de 15 rocas ígneas efusivas y fragmentales, particularmente para las rocas piroclásticas se seleccionaron 2 tobas vítreas con bajo contenido de fragmentos líticos, las muestras analizadas cubren todo el espectro composicional reconocido en terreno, para la determinación de composición química (ICP-OES, ICP-MS). Se considera la realización de análisis complementarios en el futuro. Geoquímicamente las rocas ígneas analizadas muestran contenidos de SiO₂ entre 47%-53% y 60%-65%, configurando aparentemente un arreglo bimodal, son subalcalinas y de afinidad toleítica. En los diagramas de Harker, ellas despliegan patrones sugerentes de una evolución dominada por la participación de un arreglo mineralógico de baja presión de olivino, piroxeno, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti, lo que es coherente con la mineralogía observada en las rocas y los patrones de REE que ellas presentan. Los patrones desplegados en diagramas multielemento exhiben un enriquecimiento de LILE sobre HFSE y una marcada fosa Nb-Ta, características típicas de magmas originados en ambientes de subducción. Las razones La/Yb de estas rocas varían entre 3,0-6,3 y corresponden a las más bajas reportadas para los productos ígneos de edad cenozoica en la región de estudio (e.g. Arellano, 2019). A lo largo de la columna estratigráfica estudiada, de base a techo, se observan variaciones en la composición química, entre las que destaca una disminución de: (i) los contenidos de LILE, (ii) los valores de razones LILE/HFSE, como Ba/Th, Ba/Th Rb/Y, y HFSE/HFSE, como Nb/Y, Zr/Y, Hf/Y, y (iii) los valores de las razones de REE La/Yb, La/Sm, Sm/Yb y Dy/Yb.

La secuencia estratigráfica estudiada corresponde a los afloramientos más occidentales reconocidos para rocas ígneas del Oligoceno tardío – Mioceno en la región. Lo anterior en conjunto con las características geoquímicas descritas indican que ellas representan el arco magmático frontal de este período. Este se habría desarrollado en una corteza atenuada entre 30-35 km de espesor, que habría permitido el ascenso y emplazamiento de los magmas más primitivos de la región (34°-35°S). Mientras que el magmatismo previo y posterior asociado al arco frontal, expuesto en rocas plutónicas y volcánicas ubicadas al este de la secuencia de estudio, se habrían desarrollado en una corteza comparativamente más gruesa.

Palabras Clave: Magmatismo de Arco, Cenozoico, Tectónica

Financiamiento: Esta investigación es parte de la investigación de M.Sc. del primer autor y es financiada por el proyecto Fondecyt Regular #1210475.

Referencias:

- Arellano, P. 2019. Petrogénesis del magmatismo Eoceno-Mioceno en Chile entre los 34°45'-35°15'S: Implicancias en la configuración y evolución paleogeográfica de la región. Tesis de M.Sc., Universidad de Chile, 164 p.
- Contreras, J.P. y Schilling, M. 2021. Hoja San Fernando – Curicó, Regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geológica Básica, Santiago, 37 p.

Geometría y mecanismo de emplazamiento de los Granitos del Pérmico de Cifuncho, Cordillera de la Costa de Antofagasta

Florencia Sciaraffia¹, Daniela Montenegro¹, Rodrigo González T.¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Comprender la forma en que se crea el espacio para que un plutón pueda alojarse en la corteza ha sido un constante problema para la comunidad geológica. En el norte de Chile se exponen extensos cuerpos plutónicos emplazados entre el Carbonífero Superior y Pérmico (320-256 Ma) mientras se desarrollaba un arco magmático asociado a la subducción en el margen suroccidental de Gondwana entre los 20° y 31°S (Oliveros *et al.*, 2020). Sin embargo, se desconoce el mecanismo por el que estos plutones llegaron a emplazarse en la corteza, lo que implica una dificultad para comprender su disposición y las condiciones tectónicas del ambiente en el que fueron generados.

En Antofagasta, entre Cifuncho y Pan de Azúcar (25,5°-26°S), se exponen los Granitos del Pérmico (Contreras *et al.*, 2013), sieno y monzogranitos leucocráticos de grano grueso. Estos constituyen las únicas rocas plutónicas del Paleozoico Superior registradas en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Fueron emplazadas en el Complejo Epimetamórfico de Chañaral (Devónico - Carbonífero Inferior) en dos eventos, a los 285 Ma y los 255 Ma (Contreras *et al.*, 2013). El emplazamiento de estos cuerpos ocurrió durante una etapa compresiva y se relacionarían genéticamente con el reinicio de la subducción en el Paleozoico Superior. La buena calidad de los afloramientos de sus contactos con la roca caja, en particular del techo, ofrece una oportunidad para determinar la geometría de estos cuerpos e interpretar los mecanismos de emplazamiento de los plutones durante el Pérmico-Triásico. Por medio de seis superficies estadísticas realizadas según el Método de Interpolación Triangular (TIN) en el software QGis, se pudo inferir que el plutón tiene una geometría tabular con una elongación preferencial en una orientación NNO-SSE, una leve inclinación hacia el noroeste y un espesor mínimo de ~600m. La petrografía microscópica mostró que corresponden a rocas de grano medio-fino a grueso, holocristalinas e hipidiomórficas, que varían su composición entre monzonitas cuarcíferas, granodioritas y monzogranitos. Con respecto a las metareniscas y metapelitas de la roca de caja con metamorfismo de la facies esquistos verdes, se reconoció una paragénesis de metamorfismo de contacto representada por porfiroblastos de estauroлита y cordierita. Se propone que los Granitos del Pérmico se emplazaron ca. 8 km de profundidad en un régimen local extensional, el que se habría acomodado en la corteza a partir de cuatro mecanismos: (1) extensión lateral a través de los planos de estratificación de la roca de caja, (2) descenso de su base, permitido por la acción de fallas normales sinmagmáticas, (3) *stoping* magmático local y (4) ascenso del techo asistido por estructuras sinmagmáticas. De esta forma, los cuerpos plutónicos del Pérmico Superior - Triásico en Cifuncho se habrían emplazado en extensión a través de la estratificación de la secuencia devónica de la roca de caja.

Palabras Clave: emplazamiento plutónico, Permo-Triásico, Cordillera de la Costa.

Financiamiento: Los autores quisieran agradecer el apoyo financiero en cuanto a campañas de terreno y confección de cortes transparentes cubierto por el proyecto ANID FAPESP 2019/13349-8 "Tectono-stratigraphic evolution of inter-montane basins related to forearc tectonic settings, using the Chilean Pre-Andean Depression of the Central Andes as a case study".

Referencias:

- Contreras, J. P.; Espinoza, M.; De la Cruz, R.; Jorquera, R.; Kraus, S.; Ramírez, C.; Naranjo, J. A.; Escribano, J.; & Martínez, P. (2013). Carta Cifuncho, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 161: 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Oliveros, V.; Vásquez, P.; Creixell, C.; Lucassen, F.; Ducea, M. N.; Ciocca, I.; González, J.; Espinoza, M.; Salazar, E.; Coloma, F.; & Kasemann, S. A. (2020). Lithospheric evolution of the Pre- and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 80, 202-227.

The onset of Gondwana magmatism in northern Chile: timing and characteristics

Paulina Soledad Vásquez Illanes¹, Fernando A. Sepúlveda¹, Javier Alvarez¹, Andrew Tomlinson¹, Sebastian Aguilé¹

(1) SERNAGEOMIN, Geología Regional, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

In the Coastal Cordillera, there are two sparsely out cropping units of Carboniferous magmatic rocks: early Late Carboniferous granites (ca. 317 Ma) and late Late Carboniferous granites (302-301 Ma) (2). The early Late Carboniferous granites are two-mica granites, which are intimately related to the migmatites of the Caleta Loa Metamorphic Complex (CLMC). The leucosome of the CLMC shares many compositional and textural characteristics with the early Late Carboniferous granites (2). The late Late Carboniferous rocks (302-301 Ma) are biotite granites and cordierite-bearing granites, common in the eastern side of the Coastal Cordillera, and intrude the sediments of El Toco Formation (Devonian-Lower Carboniferous) which have a very low grade of metamorphism (e.g., 3, 2). The different metamorphic conditions of the country rocks for each unit indicates they have different depths of emplacement, with the early Late Carboniferous granites (ca. 317 Ma) emplaced into deeper crust than the late Late Carboniferous granites (302-301 Ma). The presence of these Carboniferous units is somewhat anomalous in the Coastal Cordillera and have been interpreted as forearc magmatism (1, this work).

To the east, in the Sierra de Moreno, the Sierra de Moreno Plutonic Complex (SMPC) was emplaced in two pulses between 316 and 310 Ma (4). The older one is composed of quartz-bearing diorites and tonalites with ages between 316 y 314 Ma, and the second pulse consists of monzogranites, alkali feldspar-bearing granites and two-mica syenogranites with an age of 310.1±2.0 Ma that are intruded by a 306.2±2.1 Ma rhyolitic stock (4). The groundmass of this rhyolitic stock has devitrification textures, indicating a shallow subvolcanic emplacement environment and from this intrusive relationship it can be inferred that the magmatic activity of the SMPC after an important exhumation event in the area between 310 and 306 Ma (4).

In contrast magmatic units in the Sierra del Medio are mainly volcanic (Collahuasi Formation) and subordinate intrusive rocks and have an age late Carboniferous to early Permian (308-295 Ma). The Collahuasi Formation is composed of rhyolites and dacites (308-295 Ma), andesite and basaltic andesite (pre- or syn- 307 Ma), and sedimentary rocks (4).

The Carboniferous magmatic rocks of Sierra de Moreno and Sierra del Medio, represent domains that show different paleodepths of emplacement and crystallization in the Carboniferous crust. In the Sierra de Moreno, they are almost exclusively intrusive rocks which intruded on old crust (Sierra de Moreno Metamorphic Complex with a Proterozoic protolith, Ordovician Granitoids) (4). In contrast, the Carboniferous magmatic rocks in the Sierra del Medio are mainly effusive volcanics, related shallow intrusions and lesser 309-295 Ma biotite-hornblende granodiorite and granite (4). The Sierra de Moreno and Sierra del Medio are separated by the Cortadera-Coipuno and Arca faults, both regional reverse faults with important Late Cretaceous and Eocene displacements. The different sections of the Carboniferous crust were juxtaposed prior to deposition of Triassic and Jurassic sedimentary successions, suggesting these faults had a pre-Triassic history as well.

Preliminary conclusions based on the Carboniferous geology at 21-22°S are:

- The first magmatic products of the Gondwana subduction recorded in this area were produced ca. 317 Ma in the Cordillera de la Costa and Sierra de Moreno, ca. 23 million years after initiation of the Gondwana subduction at 29-31°S.
- At this latitude there are abundant Late Carboniferous magmatic rocks spanning the Cordillera de la Costa to la Sierra del Medio.
- There are at least two pulses of plutonic rocks; an older one emplaced in a deeper section of the crust (pre and syn-310 Ma), and a second one (post-310 Ma) with characteristics of emplacement in a shallow section of the crust, both recognized in the Coastal Cordillera and the Sierra de Moreno. There is also evidence for an exhumation between the 310 and 306 Ma in the Sierra de Moreno.
- There is evidence for pre-Triassic activity of the Cortadera-Coipuno and Arca Faults, which put in contact two different sections of the Late Carboniferous crust.
- The early Late Carboniferous plutonic rocks in the Coastal Cordillera are the product of a thermal anomaly in the forearc which produced an important event of anatexis (CLMC) in this area.

Keywords: Gondwana, subduction, magmatism.

Financing: This work is part of the National Mapping Program of the Chilean Geological and Mining Survey (SERNAGEOMIN).

References:

- (1) Creixell, C., Sepúlveda, F., Álvarez, J., Vásquez, P., Velásquez, R. 2021. The Carboniferous onset of subduction at SW Gondwana revisited: Sedimentation and deformation processes along the Late Paleozoic forearc of north Chile (21°-33° S). *Journal of South American Earth Sciences*.
- (2) Vásquez, P., Sepúlveda, F., Quezada, A., Aguilé, S., Franco, C.; Blanco, N. 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica n°195-196, 93 p. Escala 1:100.000, Santiago.
- (3) Bahlburg, H.; Vervoort, J.; Du Frane, S.; Bock, B.; Augustsson, C.; Reimann, C. 2009. Timing of crust formation and recycling in accretionary orogens: Insights learned from the western margin of South America. *Earth-Science Reviews* 97: 215-241.
- (4) Aguilé, S.; Franco, C.; Tomlinson, A.J.; Blanco, N.; Álvarez, J.; Montecino, D.; Gardeweg, M.; Campos, V.; Rodríguez, C.; Maksaev, V.; Bodadilla, H.; Vásquez, P.; Grunder, A.L.; Dilles, J.H. 2019. Geología del área Quehuira-Chela, regiones de Tarapacá y Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 207: 293 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Interacción entre procesos eruptivos, deformación y estructuras heredadas en el intraarco del margen convergente andino: caldera La Pacana, San Pedro, Chile

Idir Bascuñán Espindola¹⁻²⁻³, Rodrigo Gonzalez¹⁻², Matías Arriagada¹⁻²⁻³, Gonzalo Moreno¹⁻²⁻³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Instituto Milenio Ckelar Volcanes, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Programa de Magíster en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La estrecha relación entre tectónica y volcanismo en el orógeno andino ha sido objeto de diferentes estudios durante los últimos años (e.g. Petrinovic *et al.*, 2006, Ramos, 2021). Algunos autores han correlacionado las composiciones de magmas y morfologías de centros volcánicos a la cinemática de las fallas que controlan el volcanismo. Otros autores han asociado el control tectónico en la circulación de fluidos y magma en la corteza a la geometría de los planos de falla y la orientación del campo de esfuerzo (Norini *et al.*, 2013). Acocella *et al.* (2011) correlacionan la geoquímica de los magmas a su ubicación respecto a la falla controladora: ubican los magmas de composiciones más evolucionadas al centro de la estructura mientras que los más primitivos en la periferia. En los Andes Centrales, existen diversas zonas de falla transilitosféricas de orientación NW en el basamento de la cadena volcánica (Lanza *et al.*, 2013), las cuales tienen asociadas múltiples fallas regionales transcurrentes, subparalelas entre sí. Estas fallas controlan sistemas de conductos alimentadores de volcanes (Giambiagi *et al.*, 2016). En este contexto, aproximadamente a los 23°30' S, 67°30' W, se encuentra ubicada la Caldera La Pacana, identificada como una de las calderas más grandes del mundo, cuyas dimensiones se aproximan a 60 km por 35 km. Se ha sugerido un control estructural en su formación, sobre la base de su geometría de hemi-graben y la presencia de estructuras regionales que atraviesan el área, como la zona de falla Calama – Olacapato – El Toro (COT). Parte de los márgenes de la caldera se orientan de manera subparalela al COT, lo que podría sugerir el control de esta estructura en el colapso de la caldera (Lindsay *et al.*, 2001). La Pacana se ha teorizado como la fuente de las ignimbritas Atana y Toconao, las cuales suman un volumen de 2.700 km³ (Lindsay *et al.*, 2001), y representan la quinta mayor erupción del registro geológico, ocurrida hace aproximadamente 4 Ma. Sin embargo, pese a la importancia geológica de esta caldera, solo se conoce parcialmente su dinámica de formación y evolución, así como su relación con la tectónica regional. Adicionalmente, la presencia de múltiples edificios volcánicos resurgentes al interior de la caldera ha sido parcialmente estudiada. En el presente trabajo se muestran resultados preliminares del alineamiento volcánico determinado con el método de Paulsen y Wilson (2010), quienes proponen una metodología precisa de análisis de alineamientos volcánicos, a partir de la cual se podría interpretar el estado de *stress* cortical. La relación entre estos alineamientos volcánicos y las fallas reconocidas en el área de estudio muestran que los sistemas estructurales heredados en la corteza son una variable que controla parcialmente la distribución y evolución espacial de los centros eruptivos. En particular, el control estructural de la zona de falla COT ha sido un elemento de primer orden en la formación y evolución de la caldera La Pacana.

Palabras Clave: Volcanismo, Tectónica, Análisis morfoestructural, Caldera La Pacana, Zona de falla Calama - Olacapato - El Toro.

Referencias:

- Acocella, V., Gioncada, A., Omarini, R., Riller, U., Mazzuoli, R., & Vezzoli, L. (2011). Tectonomagmatic characteristics of the back-arc portion of the Calama–Olacapato–El Toro fault zone, Central Andes. *Tectonics*, 30(3).
- Giambiagi, L., Alvarez, P., & Spagnotto, S. (2016). Temporal variation of the stress field during the construction of the central Andes: Constraints from the volcanic arc region (22–26 S), Western Cordillera, Chile, during the last 20 Ma. *Tectonics*, 35(9), 2014-2033.
- Lanza, F., Tibaldi, A., Bonali, F. L., & Corazzato, C. (2013). Space–time variations of stresses in the Miocene–Quaternary along the Calama–Olacapato–El Toro fault zone, Central Andes. *Tectonophysics*, 593, 33-56.
- Lindsay, J. M., Schmitt, A. K., Trumbull, R. B., De Silva, S. L., Siebel, W., & Emmermann, R. (2001). Magmatic evolution of the La Pacana caldera system, Central Andes, Chile: Compositional variation of two cogenetic, large-volume felsic ignimbrites. *Journal of Petrology*, 42(3), 459-486.
- Norini, G., Baez, W., Becchio, R., Viramonte, J., Giordano, G., Arnasio, M., ... & Groppelli, G. (2013). The Calama–Olacapato–El Toro fault system in the Puna Plateau, Central Andes: geodynamic implications and stratovolcanoes emplacement. *Tectonophysics*, 608, 1280-1297.
- Paulsen, T. S., & Wilson, T. J. (2010). New criteria for systematic mapping and reliability assessment of monogenetic volcanic vent alignments and elongate volcanic vents for crustal stress analyses. *Tectonophysics*, 482(1-4), 16-28.
- Petrinovic, I. A., Riller, U., Brod, J. A., Alvarado, G., & Arnasio, M. (2006). Bimodal volcanism in a tectonic transfer zone: evidence for tectonically controlled magmatism in the southern Central Andes, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 152(3-4), 240-252.
- Ramos, V. A. (2021). Fifty years of plate tectonics in the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102997.

Formación de un domo estructural y posterior deslizamiento en fallas tectónicas gatillados por alzamiento magmático: el caso del Complejo Volcánico Laguna del Maule

Brenda Carvalho Vera¹, Nicolás Garibaldi Marcolini¹

(1) Universidad Andrés Bello, Departamento de geología, Facultad de Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

El Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLM) es uno de los sistemas volcánicos riolíticos más voluminosos de la Zona Volcánica Sur, resultando en una concentración de riolita única en los Andes. Lo componen al menos 130 centros volcánicos cuaternarios, encontrándose en su centro el lago homónimo. En el CVLM se han identificado dos eventos de inflación asociados a actividad magmática. El primer evento ocurrió hace 9.4 ka; el segundo evento comenzó en 2007 y continúa en el presente. Este segundo evento causa un levantamiento superficial promedio de 20 cm/año.

Estudios geodésicos evidencian que todo el CVLM sufre alzamiento. Sin embargo, sólo en la porción NW del CVLM los sedimentos lacustres jóvenes (< 20 ka) presentan fallas y fracturas que han sido reactivadas por la inflación. Todas estas estructuras han sido identificadas en el bloque colgante de la falla Troncoso la cual se extiende por más de 30 km con rumbo NE y manto hacia el NW. Esta falla de origen tectónico ha sido interpretada como normal e intersecta el CVLM desde el SW. Nuestra hipótesis inicial es que en las zonas en que no se observan estructuras frágiles, la formación de un domo estructural acomodan parte de la deformación cortical causada por la inflación pasada y presente.

Para testear la hipótesis, se establecieron 2 predicciones derivadas de modelos de formación de domos estructurales a partir de inyecciones magmáticas: 1) los sedimentos lacustres jóvenes (<20 ka) tendrán una dirección de manto que se aleja de los centros de inflación pasado y presente, formando un patrón radial; 2) la magnitud del manto será mínima en el centro y los extremos de la zona afectada por la inflación, mientras que será máxima en la zona intermedia. Para testear la predicción 1, realizamos un análisis de bootstrap para determinar la orientación de sedimentos estadísticamente significativa y compararlas con las direcciones de manto predichas por observaciones InSAR previas. Los resultados indican que los sedimentos en la mayoría de los sitios analizados presentan rumbos hacia el NNE-NE, con suaves a moderados manteos hacia el SE, en lugar del patrón radial esperado. Para testear la predicción 2, se realizó un análisis entre la distancia al centro de inflación y la magnitud de manto. La predicción sólo se cumple para el caso de inflación <9.4 ka, mostrando manteos de menor magnitud en ubicaciones más próximas y distales al centro de inflación, mientras que aquellas que se ubican a distancias intermedias poseen una mayor magnitud de manto.

Los resultados permiten rechazar la hipótesis para el caso de inflación presente, y dan lugar a una alternativa interesante e inesperada: la magnitud de los manteos para el alzamiento <9.4 ka es consistente con lo predicho por la inflación, sin embargo, los sedimentos, originalmente horizontales, mantean predominantemente al SE. Especulamos que esto podría indicar la formación de un domo estructural que posteriormente ha rotado a lo largo de un eje NE horizontal. Proponemos que esta rotación podría ser producto de deslizamientos en la falla Troncoso, gatillados por alzamiento de origen magmático.

Palabras Clave: Laguna del Maule, Falla Troncoso, Rotación de bloque, Domo, Alzamiento magmático.

Financiamiento: Este trabajo está financiado por el proyecto ANID: "Multi time-scale (Million years to years) crustal strain dynamics within the active Laguna del Maule volcanic field". N°11220254.

Agradecimientos: Mis agradecimientos al Dr. Nicolás Garibaldi por darme las herramientas, motivación y la oportunidad de ser parte de ésta interesante investigación.

Trapdoor fault activation: a step towards caldera collapse at Sierra Negra, Galápagos, Ecuador

Francisco Delgado¹, Tara Shreve²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología
(2) University of Alaska, Fairbanks, Geophysical Institute

The 2018 Sierra Negra eruption resulted in meter-scale subsidence due to basaltic magma extraction from a deflating reservoir, and eruption along a horizontal dike that propagated away from the caldera. The eruption was also characterized by >4 M_w earthquakes, and sulfur dioxide emissions. We use a combination of Interferometric Synthetic Aperture Radar, Digital Elevation Model, Global Positioning System and seismic data to assess conditions required to trigger episodic caldera collapse at Sierra Negra. We use data from the Sentinel-1, ALOS-2, COSMO-SkyMed, and TanDEM-X SAR missions, and optical data from the Pléiades mission. The 2018 effusive eruption was mainly sourced from a horizontal sill located at ~ 2 km depth, with a minimum erupted bulk volume of 0.19 km^3 . The modeled reservoir is bound by a C-shaped ring of seismicity, suggesting trapdoor fault slip. Two >4.5 M_w earthquakes (5 and 22 July 2018) produced localized subsidence north of the southern trapdoor fault. The temporal evolution of deformation was recorded by a GPS station in the middle of the caldera, and follows a steep decrease during the sill propagation phase, followed by an exponential trend that can be indicative of either caldera collapse or reservoir deflation. After removing the modeled subsidence signal, distributed normal trapdoor fault slip explains the location of residual displacement. Furthermore, distributed fault models indicate slip occurred along the northern, central and southern segments of the trapdoor fault during the entire eruption, until 25 August 2018. Theoretical models of caldera collapse estimate that an erupted volume of 0.19 km^3 is too small to trigger full-scale caldera collapse, given the caldera aspect ratio (depth/diameter) of 0.22. Nonetheless, the spatial distribution and duration of seismicity and slip suggest trapdoor fault activation is the initial stage of caldera collapse at Sierra Negra, which may lead to full-scale caldera collapse during larger eruptions. Alternatively, hundreds of medium-sized eruptions, similar to that of 2018, may have triggered fault slip events over the past millennia.

Keywords: InSAR, Caldera, Galápagos.

Fallas jóvenes para identificar mecanismos de acomodación de deformación en campos volcánicos experimentando inflación magmática: el caso del Complejo Volcánico Laguna del Maule, Chile

Millaray Lapierre Cruz¹, Nicolás Garibaldi Marcolini¹, Mauro Navarrete Reyes²

(1) Universidad Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 851, Santiago, Chile

El Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLM), en la Zona Volcánica Sur, es una de las mayores acumulaciones de riolita post-glacial del hemisferio sur. Su actividad inició hace 1,5 Ma y ha producido >250 km³ de productos volcánicos. Variaciones de 62 m en la elevación de la paleolínea de costa de 9,4 ka, originalmente horizontal, permiten reconocer la deformación producida por la inflación en la porción más elevada en el sureste de la Laguna del Maule. Actualmente, el CVLM experimenta alzamiento iniciado en el 2007, el cual fue detectado mediante geodesia. La inflación alcanza tasas de alzamiento de hasta 28 cm/año y es atribuida a inyecciones magmáticas en el reservorio somero.

En el CVLM, la falla normal de Troncoso, de rumbo NE, corresponde a la estructura principal que acomoda extensión tectónica NW-SE. Esta falla corta al CVLM, y en su bloque colgante alberga abundantes fallas normales de rumbo NE. Dichas fallas tienen orientaciones consistentes con las predichas por elongación tectónica; sin embargo, la máxima elongación acumulada es consistente con la inflación determinada a partir de la paleolínea de costa. Esto indica que la reactivación de estas fallas de origen tectónico acomoda parte de la deformación causada por la inflación de <9,4 ka.

Por otra parte, el rol de las estructuras frágiles en la acomodación de deformación causada por el presente evento de inflación es enigmático, ya que escasas fallas menores son consistentes con la elongación predicha para la inflación actual. Para responder esta interrogante, comparamos la elongación determinada a partir de fallas medidas en las mismas transectas en los años 2017, 2022 y 2023. Estas fallas se encuentran alojadas en sedimentos lacustres postglaciales (<23 ka) en distintas áreas del sector NW del CVLM. Para realizar esta comparación, primero determinamos la dirección de máxima elongación considerando frecuencia, orientación y desplazamiento de las fallas. Luego cuantificamos la elongación en dicha dirección, calculando el desplazamiento real a partir de la separación aparente medida, considerando la cinemática, orientación del estrato marcador, orientación de la falla y orientación de la transecta. Para 2017, la dirección de máxima elongación presentó una orientación con una marcada tendencia NW-SE evidenciada en las transectas 1, 2 y 4, mientras que, la transecta 3 arrojó una dirección de máxima elongación contraria orientada NE-SW. La elongación en dichas transectas arrojaron valores de: 0,015% para la transecta 1; 0,521% para la transecta 2 y 0,062% para la transecta 3, todas ubicadas en la Andesita Península, mientras que para la transecta 4 ubicada en la Riolita Espejos la elongación arrojó un valor de 1,206% (Navarrete, 2022). El análisis de los datos de 2022 y 2023 se encuentra en curso, y se ha expandido a un total de 6 transectas. Un aumento en la elongación estimada en cada transecta indicaría que en CVLM, la deformación frágil acomoda parcialmente la elongación asociada a alzamiento causado por inyección magmática. La ausencia de diferencias significativas de elongación podría implicar que: 1) no se ha acumulado suficiente deformación para causar desplazamiento en las fallas; 2) la localización de deformación ha migrado a otra zona del CVLM; (3) la deformación actual está siendo acomodada por otro mecanismo, como basculamiento.

Palabras Clave: Inflación magmática, Deformación magmática, Fallas y magmatismo, Laguna del Maule, Volcanismo.

Financiamiento: Este trabajo se encuentra financiado por el proyecto ANID N°11220254.

Agradecimientos: Agradezco enormemente al Dr. Nicolás Garibaldi por darme la oportunidad de participar en este proyecto y por guiarme y enseñarme en el proceso.

Referencias:

- Navarrete, M. (2022). Relación entre fallamiento reciente e inflación superficial en el Complejo Volcánico Laguna del Maule, Chile (tesis de grado). Universidad Andrés Bello, Santiago.

Nuevos resultados termobarométricos del basamento metamórfico de Chile (29°15' - 51°30'S)

Fernanda Acevedo¹, Lucas Silva¹, Stefany Salinas¹, Fabian Lambert¹, Tomas Soto¹, Catalina Jeria¹, Matías Gómez¹, Mauricio Calderón², Francisco Herve¹⁻³

(1) Universidad Andrés Bello, Ciencias de la tierra, Ingeniería, República 252, Santiago, Chile
 (2) Universidad del Desarrollo, Geología, Ingeniería, Avenida Casa 680, Las Condes, Santiago, Chile
 (3) Universidad de Chile, Geología, Ingeniería, Plaza de Ercilla 803, Santiago, Chile

El Basamento Metamórfico a lo largo de Chile ha descrito una serie de eventos de deformación que evidencian parte de la evolución geológica del margen occidental de Gondwana. Estos han sido interpretados como diversos paleopismas de acreción que se desarrollaron a mediados del Paleozoico hasta finales del Mesozoico. Durante las últimas décadas, diferentes estudios han contribuido para entender la complejidad de estas rocas, describiendo y asociando los aspectos que las representan. Se ha logrado identificar y agrupar los distintos complejos metamórficos en zonas a lo largo de nuestro país, los que se caracterizan por sus asociaciones minerales, composiciones químicas, procedencia y dataciones, argumentadas con condiciones de presión y temperatura propias de cada uno, donde se atribuyen facies y series metamórficas. Algunos de estos complejos se distribuyen a través de la costa del margen chileno tanto de forma continua como discontinua. En la zona norte de Chile, a partir de los 21°S se exponen afloramientos aislados. Posteriormente, se disponen afloramientos de forma semi continua entre los 25°S y 29°15'S, con una ausencia de rocas metamórficas entre los 27°20'S y 28°S. Adicionalmente entre los 30°30'S y 32°S, éstos se encuentran nuevamente como afloramientos discontinuos (Díaz-Alvarado *et al.*, 2019). Particularmente en Chile Central, a los 34°S se prolonga rocas de manera continua hasta los 38°S, que debido a sus características se han definido como un cinturón pareado metamórfico (Miyashiro, 1961), compuesto por una Serie Occidental y una Serie Oriental (Aguirre *et al.*, 1972; Hervé, 1988; Hervé *et al.*, 2007). Ambas se desarrollan de manera contemporánea con el Batolito Costero (Hervé, 1977; Hervé, 1988; Díaz-Alvarado *et al.*, 2019). Luego, en la zona centro-sur se define el Complejo Metamórfico Bahía Mansa, que se extiende entre los 39°30'S hasta los 42°S (Duhart *et al.*, 2001). Finalmente, al sur del punto triple (~45°S-46°S), se reconocen los Complejos Metamórficos de los Andes Patagónicos y Fueguinos, en conjunto con el Batolito Patagónico, que se registran hasta los ~56°S en el Estrecho de Magallanes, con afloramientos distribuidos tanto en la Cordillera Andina Principal como al este, en las Regiones de Aysén y Magallanes (Hervé *et al.*, 2007; Calderón *et al.*, 2016).

Este trabajo contempla profundizar en estas materias, incorporando nuevos resultados termobarométricos. Estos se prolongan desde el norte hacia el sur del país en tres zonas de estudios, donde se obtienen siete muestras. En localidades que se ubican entre las latitudes 29° y 51°S, dando a conocer antecedentes propios de cada complejo metamórfico en estudio. En la Zona Centro-Norte, en la Región de Coquimbo se tiene la muestra de Punta de Choros asociada al Complejo Metamórfico Punta de Choros (CMPC) y Huentelauquén perteneciente al Complejo Metamórfico del Choapa (CMC). En la Zona Centro-Sur, en la Región del Maule se encuentran Los Pellines y Curanipe ubicadas en la Serie Occidental (SO). Así mismo, en la Región del Biobío se tiene a Lebu que es extraída de la Serie Oriental (SE) y Curiñanco que pertenece al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM), en la Región de Los Ríos. Finalmente, en la Zona Sur en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, se cuenta con una muestra de la Isla Diego de Almagro correspondiente al Complejo Metamórfico Diego de Almagro (CMDA).

Como parte de la metodología empleada, se llevan a cabo análisis petrográficos, geoquímicos, que incluyen química mineral y química de roca total, mineralógicos, petrológicos e interpretación de mapas composicionales obtenidos a partir del método de espectrómetros dispersores de longitud de onda, a través de microsonda electrónica. Por medio de la aplicación de estos análisis y el uso de software de cálculos termodinámicos, es posible determinar campos de estabilidad de una asociación mineral denominadas pseudosecciones. Estos cálculos se realizan dentro de rangos cuantitativos de parámetros definidos por una ventana P-T, que permiten establecer las condiciones de presión y temperatura en las que los minerales se estabilizan. En primer lugar, se realiza un análisis petrográfico de cada muestra para identificar todas las asociaciones minerales presentes y determinar las fases minerales que se encuentran en aparente equilibrio químico. Luego, se determina la clasificación mineral de cada muestra mediante la química mineral, en conjunto con la clasificación de roca total en diagramas AKF y AFM. Para esto se utilizan parámetros obtenidos previamente de estudios realizados en ciertas muestras, Los Pellines, Curanipe, Lebu y Curiñanco (González Bonorino, 1971; Hervé, 1977; Willner *et al.*, 2001), para establecer la correlación entre la química de roca total y química mineral de cada muestra. Estos parámetros se basan en factores como la ubicación geográfica, características petrográficas y petrológicas, asociación mineral similares y química mineral. Estos criterios permiten establecer una equivalencia entre la química de la roca total y la química mineral en las muestras analizadas. Además, se cuenta con datos obtenidos de estudios realizados en la Universidad de Stuttgart (Alemania) sobre la roca correspondiente a cada complejo mineral, Punta de Choros, Huentelauquén e Isla Diego de Almagro (Tabla 1). Estos datos pueden ser integrados utilizando el software Perple_X (Connolly, 1990) en función de la caracterización mineral de cada muestra y aplicando rangos específicos de presión y temperatura. Esto facilita la creación de pseudosecciones e isopletras que permiten estimar las diferentes fases minerales estables.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. En la Zona Centro-Norte del país, específicamente en las localidades de Punta de Choros y Huentelauquén, se han identificado condiciones metamórficas distintas. En Punta de Choros, se observó un peak metamórfico en el rango de 7,7 - 8,7 kbar a 550° - 580°C en los bordes de los granates zonados. Esto indica una trayectoria metamórfica progradada, seguida de una fase retrógrada en la que aparecen minerales hidratados como el grupo de las micas, con presiones aproximadas entre los 4.5 - 5.2 kbar y temperaturas entre 540° - 560°C, permitiendo establecer una trayectoria metamórfica en sentido horario (Acevedo, 2022). Por otro lado, en Huentelauquén se registraron condiciones metamórficas de 3 - 7,5 kbar a 380° - 400°C. Estas condiciones se determinaron a través del análisis de la relación entre núcleo y el borde de la fengita, esta información permitió establecer una trayectoria metamórfica en sentido horario (Gómez, 2021). En la Zona Centro-Sur del país, se encuentran las localidades de Los Pellines y Curanipe, donde se han obtenido datos sobre las condiciones de presión en el rango de 6 a 8 kbar y temperaturas entre 450° - 510°C.

Estas condiciones se determinaron a partir de la presión mínima obtenida en el borde del mineral granate, y se interpretó la existencia de un metamorfismo retrógrado a través de la intersección de fengita y clorita (Silva, 2021). Por otro lado, en Curanipe se observaron condiciones metamórficas de 5,2 - 8 kbar a 425° - 470°C. Al igual que en Los Pellines, las condiciones mínimas se determinaron a partir de la fase de zonación presente en los granates, lo que indica la existencia de un metamorfismo retrógrado. Asimismo, se ha interpretado que la información en conjunto con la relación de borde entre las fases minerales moscovita y clorita (Salinas, 2021). En la Zona Sur y extremo Sur del país, se obtuvieron los siguientes resultados en relación a las condiciones metamórficas: En la localidad de Lebu, se registraron condiciones de presión en el rango de 2 - 6,6 kbar y temperaturas 340° - 470°C. Se observaron temperaturas máximas en granates pseudomorizados a clorita y condiciones de cierre en fases retrógradas, indicadas por la intersección de muscovita y clorita (Lambert, 2021). En el sector de Curiñanco, se obtuvieron valores de presión 6,4 - 8,2 kbar y temperaturas entre 370° - 510°C. Estas condiciones se determinaron a partir de la intersección entre granate y mica blanca, sin embargo, existe incertidumbre en la temporalidad de cristalización de las fases minerales presentes en estas rocas (Soto, 2021). En el sector de la Isla Diego de Almagro, se registraron condiciones de presión en el rango de 5,1 - 11,6 kbar y temperaturas entre 470° - 570°C. Estas condiciones indican un metamorfismo retrógrado marcado por la recrystalización del granate (Jeria, 2023).

Tabla 1: Valores de P/T obtenidos en Punta Choros, Huentelauquén, Los Pellines, Curanipe, Lebu, Curiñanco e Isla Diego de Almagro. Además, se especifican los autores donde se obtuvo la química de roca total utilizada para la confección de las pseudosecciones de algunas muestras que no poseían su propio análisis.

P/T	Ubicación	Complejo metamórfico / Edad	Autor química roca total
[7,7-8,7 kbar; 550°-580° C]	Punta Choros (29°15'S)	CMPC / Carbonífero - Pérmico Inferior	Propia de la muestra
[3-7,5 kbar; 300°-400° C]	Huentelauquén (31°45'S)	CMC / Carbonífero Superior - Pérmico Medio	Propia de la muestra
[6-8 kbar; 450°-510° C]	Los Pellines (35°17'S)	SO / Carbonífero Superior - Pérmico Inferior	González Bonorino (1971)
[5,2-8 kbar; 425°-470° C]	Curanipe (35°51'S)	SO / Carbonífero Superior - Pérmico Inferior	González Bonorino (1971), Hervé (1977)
[2-6,6 kbar; 340°-470° C]	Lebu (37°37'S)	SE / Carbonífero Inferior - Pérmico Inferior	González Bonorino (1971)
[6,4-8,2 kbar; 370°-510° C]	Curiñanco (39°45'S)	CMBM / Carbonífero-Pérmico	Willner et al. (2001)
[5,1-11,6 kbar; 470°-570° C]	Isla Diego de Almagro (51°30'S)	CMDA / Cretácico	Propia de la muestra

En general se observan variaciones en las condiciones metamórficas en las tres zonas de estudio, indicando la presencia de distintos eventos geológicos en estas áreas. Esto es asociado a diferentes momentos de formación para estas rocas dentro de la evolución del prisma de acreción que tuvo lugar durante la subducción paleozoica, la cual se extiende hasta el mesozoico hacia el sur.

Los resultados obtenidos muestran variaciones significativas en las condiciones metamórficas de la Zona Centro-Norte entre Punta de Choros y Huentelauquén. Particularmente la muestra perteneciente al Complejo Metamórfico Punta de Choros muestra mayores temperaturas en relación a las muestras expuestas más al sur, con presiones que van en el rango de medias a altas asociadas a facies de anfíbolitas de epidota y anfíbolitas en su peak metamórfico. En Huentelauquén, estos difieren tanto en presión como en temperatura, donde en este último las rocas alcanzan un grado metamórfico menor asociado a facies de anfíbolita de epidota. En la Zona Centro-Sur, Los Pellines, Curanipe y Curiñanco, existe una evolución donde los rasgos del metamorfismo son estrechamente similares. También son asociados a la evolución paleozoica del prisma de acreción pero en momentos contemporáneos, esto a diferencia de lo ocurrido en el norte. La distinción entre las rocas se enfoca en el gradiente geotérmico que alcanzan, en contraste con estos parámetros que presentan un leve incremento hacia el sur de la zona en general. Mientras que en Lebu se distingue un gradiente geotérmico inferior dada la disminución en sus condiciones de presión y temperatura. Por su parte en la Zona Sur Diego de Almagro se tienen muestras que alcanzan las facies de eclogitas. Rocas que sólo se observan en dicha localidad, por lo que se infiere que se debe a diferentes eventos asociados a la subducción, con edades cretácicas.

Como bien se puede observar en la Figura 1, a raíz de los resultados calculados, se han interpretado trayectorias con sentido horario para todas las localidades y se puede observar que siguen tendencias entre las facies de esquistos verdes, anfíbolitas de epidota, anfíbolitas y eclogitas. En consecuencia se asocian estas facies a una zona de metamorfismo regional y de subducción. Asimismo, las trayectorias metamórficas obtenidas denotan cambios en la presión y temperatura de formación de las rocas estudiadas con variaciones en cuanto a su latitud. Mediante el cálculo del peak metamórfico se obtienen dos casos, cuando se presenta la química de roca total se logra obtener condiciones de presión y temperatura; por otro lado, las rocas que incluyen un análisis de roca total asociado a datos bibliográficos presentan una presión mínima para este peak metamórfico.

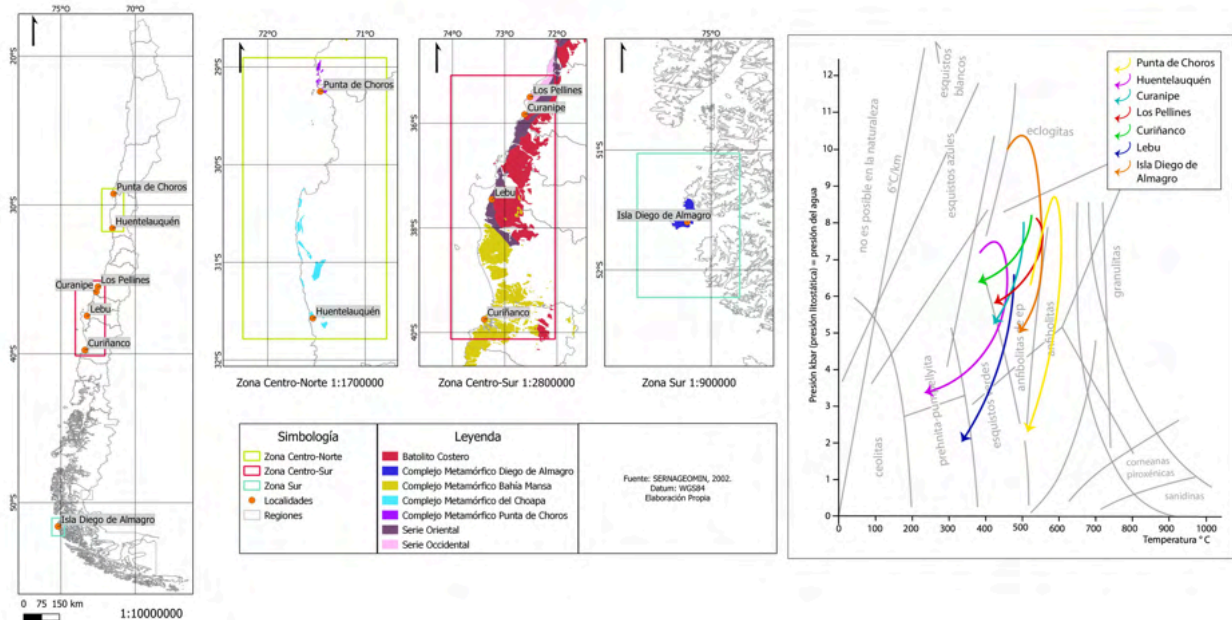


Figura 1. Mapa de zonas de estudio, localidades, unidades geológicas y trayectorias metamórficas, este último realizado a partir del diagrama de facies metamórficas de Demange (2012). Datos obtenidos de SERNAGEOMIN (2002).

Finalmente, a lo largo de los complejos metamórficos estudiados la presencia de rocas pertenecientes a facies de esquistos verdes se encuentran sólo observadas en la localidad de Los Pellines. De igual forma, se distingue la ausencia de rocas pertenecientes a las facies de esquistos azules a lo largo de las tres subzonas. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la evolución geológica, la deformación de las rocas y la distribución de minerales, proporcionando una valiosa información sobre la historia geológica y la evolución de cada región de Chile en particular.

Palabras Claves: Metamorfismo, Geotermobarometría, Petrografía, Química mineral, Pseudosección.

Financiamiento: Proyectos FONDECYT N° 1130227 & 1180457.

Agradecimientos: Agradecemos al equipo de trabajo por su ardua cooperación y en especial a los profesores Mauricio Calderón Nettle, Francisco Hervé y miembros de las comisiones.

Referencias:

- Acevedo, F. (2022). Estimación de Condiciones P/T de Metamorfismo en la Subunidad de Esquistos Micáceos del Complejo Metamórfico Punta de Choros (29°15'S). Región de Coquimbo, Chile Central-Norte (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Gómez, M. (2021). Análisis y Determinación de Condiciones P-T Asociadas al Complejo Metamórfico Choapa, 31°- 32° S (Memoria de título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Jeria, C. (2023). Modelamiento Termodinámico y Petrogenético de Metapelita del Complejo Metamórfico Diego de Almagro, en la Región de Magallanes, Chile (51°30'S) (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Lambert, F. (2021). Condiciones P-T del Basamento Metamórfico Cercano a la Localidad de Lebu (~37°30'), Región del Bío-Bío (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Salinas, S. (2021). Condición de Presión y Temperatura de la Serie Occidental del Basamento Metamórfico, Curanipe, Región del Maule, Chile (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Silva, L. (2021). Petrografía y Geotermobarometría en la Serie Occidental del Basamento Metamórfico, Los Pellines, Región del Maule, Chile (35°28' S). (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Soto, T. (2021). Determinación de Condiciones P-T del Complejo Metamórfico Bahía Mansa, Sector Punta Nihue – Curiñanco (38°50'S – 40°00'S), Cordillera de la Costa (Memoria de Título). Universidad Andrés Bello, Santiago.

El Basamento Metamórfico entre Empedrado y Cauquenes (35°30'-36°00'S y 72°00'-72°30'O), región del Maule: metamorfismo y tectónica

Natalia Isabel Astudillo Leyton¹, Rodrigo Jorquera Bernales¹, Víctor Villa Contardo¹, Jan Pawel Domagala¹,
Grisela Matamala Contreras¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avda. Santa María #0104, Providencia, Santiago

INTRODUCCIÓN

Entre los 34°-38°S existen diversos estudios de rocas del Basamento Metamórfico reconocido en el centro-sur de Chile, los que, en general, se han concentrado en áreas con buena exposición de afloramientos hacia sectores costeros. En la cordillera de la Costa de la región del Maule, la disponibilidad de información de esta unidad está condicionada tanto por la calidad de los afloramientos, con desarrollo variable de suelos con espesores de hasta 2 m., como por el acceso a plantaciones forestales privadas. El presente trabajo resume los resultados del mapeo geológico regional, a escala 1:100.000, de la Geología de las áreas Pichibello-Cauquenes (Jorquera *et al.*, 2023), realizado en el marco del Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

En este segmento (35°30'-36°00'S y 72°00'-72°30'O), las rocas asignadas al Basamento Metamórfico de la cordillera de la Costa entre los 34° y 36°S formarían parte de un complejo acrecionario asociado al proceso de subducción desarrollado entre el Carbonífero Inferior y el Pérmico, en el margen suroeste de Gondwana (Willner *et al.*, 2005; Hervé *et al.*, 2020, entre otros). Aguirre (1965) describieron estas sucesiones como "Basamento Cristalino Precámbrico". Luego, Aguirre *et al.* (1972) propusieron la separación del Basamento Metamórfico en dos franjas representativas de cinturones metamórficos pareados, principalmente evidenciada entre los 34° y 36°S: Serie Occidental (baja T y alta P) y Serie Oriental (alta T, baja P), subdivisión recientemente validada y actualizada por autores como Hyppolito *et al.* (2015), entre otros.

LITOLOGÍA Y METAMORFISMO

En el sector estudiado, las rocas del Basamento Metamórfico definen, en general, una franja de orientación NE-SO localizada en su porción central y occidental (Figura 1a). Los afloramientos de la Serie Oriental fueron asignados al Complejo Metamórfico Las Toscas (Jorquera *et al.*, 2023) y son metapelitas, pizarras, filitas, esquistos y metareniscas subordinadas que, hacia el contacto con rocas graníticas del Carbonífero Superior, gradan a *hornfels* de andalucita y sillimanita-cordierita. Por otra parte, los afloramientos de la Serie Occidental, asignados al Complejo Metamórfico Dólimo (Jorquera *et al.*, 2023), corresponden a esquistos micáceos, pizarras y filitas subordinadas y rocas ultrabásicas serpentinizadas, probablemente asociados a yacimientos de talco, fuera del área de trabajo, con metabasaltos y 'esquistos verdes' intercalados con los esquistos micáceos antes mencionados ('esquistos grises').

Las rocas de los complejos metamórficos Las Toscas y Dólimo registran evidencias de metamorfismo regional y deformación dúctil polifásica. Además, la primera unidad registra un evento metamórfico de alta T/baja P sobrepuesto, interpretado como metamorfismo de contacto generado por el emplazamiento de intrusivos monzograníticos de biotita, con menor muscovita y hornblenda, con edades ca. 319-306 Ma (Carbonífero Superior, Jorquera *et al.*, 2023). Esto es consecuente con lo observado para la Serie Oriental entre los 34° y 36°S (e.g. Hervé, 1988; Willner *et al.*, 2005; Hyppolito *et al.*, 2014; Deckart *et al.*, 2014).

Metareniscas y metapelitas del Complejo Metamórfico Las Toscas están menos afectadas por metamorfismo de contacto (alta T/baja P), presentan una asociación de minerales metamórficos correspondiente a biotita, muscovita, cuarzo, junto con feldespato potásico y albita como minerales accesorios. Son finamente foliadas (pizarrosidad), con textura lepidoblástica a lepidogranoblástica constituida por bandas micáceas intercaladas con microlitones de cuarzo, biotita y muscovita de hábito granular. Además, se reconoce recristalización y blastesis de biotita, muscovita (sericita) y cuarzo sin clorita, asociados a minerales opacos, con feldespato potásico y albita como minerales accesorios. Allí, su grado de deformación permite distinguir, en general, la estratificación original S_0 , siendo más difícil reconocer una foliación S_2 .

Por otra parte, las rocas del Complejo Metamórfico Dólimo (DCd) presentan pizarrosidad y esquistosidad, con una asociación mineralógica representativa del evento metamórfico regional constituida por cuarzo, biotita, mica blanca muy fina, muscovita, con clorita y albita accesorias. En general, su textura es lepidoblástica a lepidogranoblástica, definida por bandas micáceas foliadas intercaladas con microlitones de cuarzo, biotita y muscovita granulares. Hacia el oeste hay un incremento de la textura porfiroblástica, relacionada a la presencia de blastos milimétricos de cuarzo y muscovita, con albita accesorias. Además, se reconoce recristalización y blastesis en los planos de foliación S_1 y S_2 , en pliegues y estructuras relictas (δS_0 ?), así como porfiroclastos con sombras de presión de cuarzo policristalino muy fino, muscovita, biotita, clorita y/o hematita.

Sobre la base de las características del metamorfismo de contacto sobrepuesto en el Complejo Metamórfico Las Toscas se definieron tres zonas minerales de oeste a este y de menor a mayor intensidad: i. zona de la biotita, ii. zona de andalucita y iii. zona de la sillimanita (figura 1a). Previamente, Moreno (1979) definió, de manera similar, las zonas minerales de (a) filitas con andalucita y (b) filitas corneanas con cordierita, sillimanita y andalucita.

En la zona de la biotita, cuya asociación mineral representativa es biotita-cuarzo-muscovita-menor feldespato-K, las evidencias de metamorfismo de contacto (baja P/alta T) son leve a moderadas, con una pérdida menor de las estructuras del metamorfismo regional previo y cambios texturales y mineralógicos que permiten distinguir el metamorfismo de contacto del evento regional previo, principalmente identificadas a nivel microscópico. Se observa un predominio de la textura lepidoblástica previa y cristales de biotita milimétrica neoformada en bandas, nódulos y estructuras sigmoidales, de color anaranjado rojizo con pérdida parcial del pleocroísmo y extinción, hábito hojoso y granular, asociada a hematita especular.

Ésta probablemente se generó a partir de biotita previa, de grano muy fino, color amarillo-verdoso, con hábito planar, diseminada o localizada en bandas. El cuarzo también está recrystalizado, lo que se observa en porfiroclastos previos donde este mineral presenta evidencias de este proceso y también cuando está diseminado, asociado a muscovita gruesa, probablemente neoformada desde mica blanca fina previa.

En la zona de la andalucita, la asociación mineral es biotita-muscovita-cuarzo-andalucita, con albita y estaurilita como minerales accesorios. En estas rocas, las evidencias de metamorfismo de contacto (baja P/alta T) son: presencia de andalucita diseminada (variedad quistolita), variación del color previo de la roca hacia tonalidades oscuras y una obliteración de las estructuras previas (S_0 y/o foliación). La distribución porcentual y tamaño de la andalucita en las rocas varía desde el límite con la zona de la biotita, donde es más escasa y milimétrica, hacia la zona de sillimanita, donde aumenta tanto su cantidad (textura moteada) como su tamaño, con cristales euhedrales centimétricos de hábito cruciforme. Además, en el sector más occidental de esta zona predomina la textura lepidogranoblástica, con bandas de biotita entrecrecida con mica blanca fina y muscovita poiquilítica, alternadas con microlitones de cuarzo granular con cristales diseminados de muscovita y biotita. Hacia el este, los porfiroblastos de andalucita distorsionan esta textura, lo que implica una transición gradual, hacia texturas granolepidoblástica fina y porfiroblástica.

En la zona de la sillimanita, cuya asociación mineral es muscovita-cuarzo-sillimanita-biotita-cordierita-epinel sin granate, las rocas corneanas son de tonalidades negruzcas a pardo anaranjadas, con textura granoblástica, de grano más grueso que en la zona mineral anterior, con cristales de muscovita, biotita y cuarzo, que pueden alcanzar tamaños centimétricos. Al microscopio, se observó sillimanita fibrosa y tabular, reemplazada por silicatos finos, así como muscovita y cordierita intersticial poiquilíticas, con micro inclusiones de silicatos. Localmente, se reconocen remanentes de andalucita con un reemplazo supérgeno variable por illita, arcillas e hidróxidos de hierro.

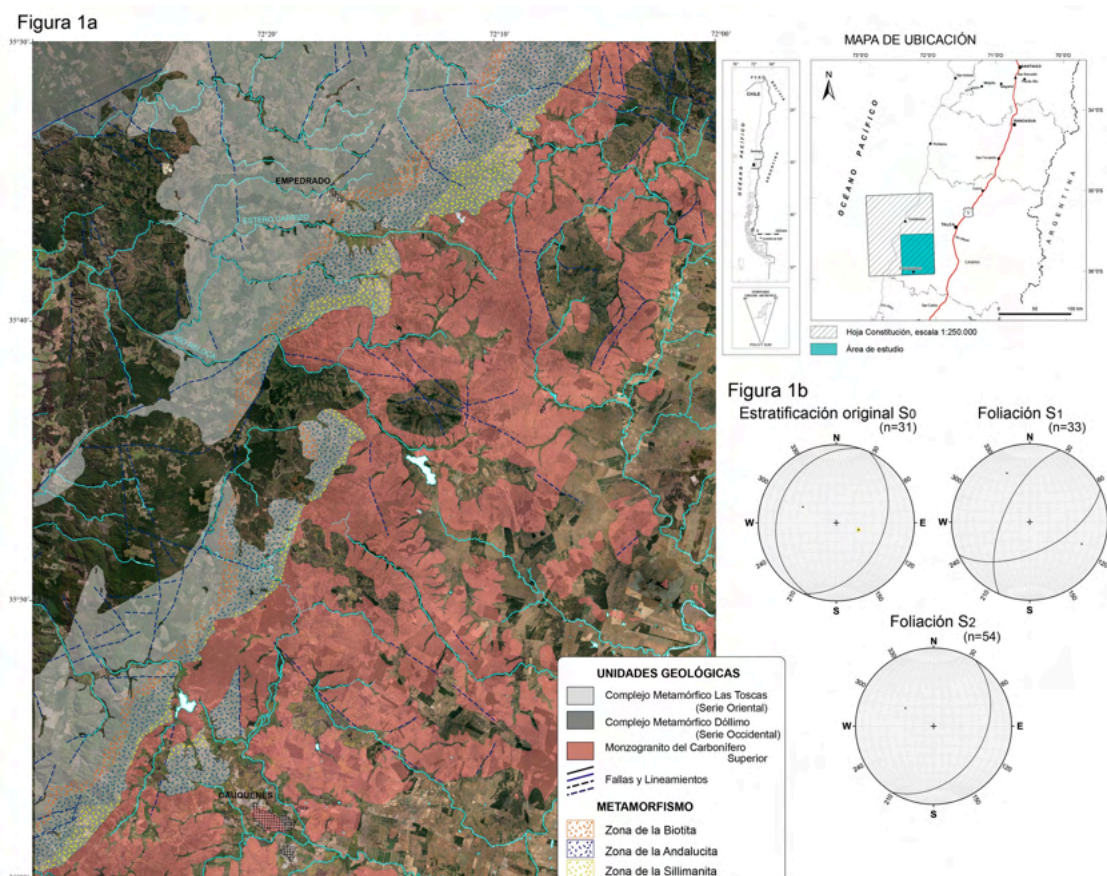


Figura 1. (a) Distribución de los afloramientos del Complejo Metamórfico Las Toscas y el Complejo Metamórfico Dólimo, el intrusivo monzogranítico del Carbonífero Superior y las zonas minerales definidas en el texto, generadas por el evento metamórfico de alta T y baja P (metamorfismo de contacto). **(b)** Diagramas estereográficos en los que se representan los planos y polos de foliación promedios calculados para la estratificación original S_0 , foliación S_1 y foliación S_2 , correspondientes a los afloramientos asignados al Basamento Metamórfico, en el área de estudio.

DEFORMACIÓN

El Complejo Metamórfico Las Toscas (DClT) tiene evidencias de deformación dúctil polifásica asociada a la existencia de, al menos, dos foliaciones principales S_1 y S_2 , paulatinamente más evidentes hacia el oeste, y una subordinada, tipo SC. Además, en general, se reconoce la estratificación original S_0 . Estas estructuras son gradualmente obliteradas hacia el este, en función del metamorfismo de contacto (baja P/alta T) generado por el emplazamiento de los intrusivos monzograníticos del Carbonífero Superior (Jorquera *et al.*, 2023). Aunque se observaron escasos pliegues monoclinales, anticlinales, sinclinales y volcados, centimétricos y métricos, su limitada exposición, discontinuidad de afloramientos y su edafización limitó su análisis estructural.

A partir de las medidas estructurales de foliación se identificaron 3 sectores que evidencian una aparente variación latitudinal, probablemente como consecuencia de eventos tectónicos posteriores. Los sectores son los siguientes:

1) Al norte del Estero Carrizo, las rocas muestran una variación desde pizarras y filitas al este a esquistos al oeste. Las foliaciones reconocidas indican la presencia de, al menos, 2 fases de deformación (S_1 y S_2), así como una estratificación S_0 en pizarras y filitas, obliterada hacia el oeste debido al aumento de la esquistosidad. Donde pudo medirse, el rumbo de S_0 varía entre $N20^\circ E$ y $N60^\circ E$, con manteos hacia el SE o NO y con valores de inclinación muy heterogéneos. La foliación S_2 es más homogénea, con rumbo aprox. $N60^\circ E$ y manteos al SE, con inclinaciones variables entre 15° y 50° , mientras que la foliación S_1 tiene un rumbo más cercano a $N70^\circ E$. Por otro lado, en filitas y pizarras las foliaciones S_1 y S_2 pueden estar crenuladas.

2) Desde el Río Reloca al sur se reconocen, principalmente, metapelitas y filitas, además de esquistos subordinados. La deformación también es polifásica, con S_1 y S_2 localmente crenulado, y con evidencias de la estratificación original (S_0). Los rumbos de las foliaciones S_2 y S_1 no coinciden, ya que para S_2 es más cercano a la dirección NS, mientras que para S_1 es variable. Cuando se pudo medir S_0 , presenta un rumbo similar al sector anterior, aunque su manteo es hacia el SE con inclinaciones mayores a 50° .

3) Entre el río Reloca, por el sur, y el Estero Carrizo, por el norte, afloran principalmente metapelitas con foliación pizarrosa, con deformación polifásica de orientaciones similares a las del segundo sector, pero con mejor preservación de la estratificación original, S_0 .

El análisis a escala regional de los datos obtenidos para la estratificación original S_0 y las foliaciones S_1 y S_2 , permitieron determinar los siguientes resultados para el rumbo y manteo de sus planos promedios: (i) S_0 : $N25^\circ E/39^\circ SE$ y $N18^\circ E/25^\circ NO$; (ii) S_1 : $N65^\circ E/58^\circ SE$ y $N23^\circ E/62^\circ NO$ y (iii) S_2 : $N32^\circ E/35^\circ SE$, con inclinaciones bastante variables para S_0 y S_1 en comparación con S_2 . (Figura 1b)

En el Complejo Metamórfico Dóllimo, la meteorización y el fracturamiento intenso de las rocas, la presencia de abundante regolito, el desarrollo de suelos y la cobertura vegetal limitó, en el área estudiada, la observación de cualquier estructura. En general, hay evidencias de una deformación dúctil polifásica (S_1 y S_2), con una estratificación original S_0 completamente obliterada. Si bien la orientación de S_1 no es representativa por las razones antes mencionadas, donde fue posible su identificación, se observó que este plano de foliación puede presentarse atrapado, finamente crenulado, plegado o desarraigado por estructuras tipo 'boudinage'. La foliación S_2 es penetrativa, con formación de micas en el plano y si bien no se identificó un patrón en su orientación, si se observa afectada por pliegues, localmente volcados, algunos de dimensiones decimétricas a métricas.

INTERPRETACIONES

Metamorfismo: Las rocas del Complejo Metamórfico Las Toscas (Jorquera *et al.*, 2023) registraron un primer evento de deformación polifásica y metamorfismo de bajo grado, facies de esquistos verdes, cuya asociación mineral indicaría una temperatura intermedia (hasta $450^\circ C$), así como la ausencia de granate sugeriría baja presión, condiciones representativas de áreas más superficiales y distales de un prisma de acreción (Willner *et al.*, 2005).

Posteriormente, el emplazamiento de los intrusivos generó un metamorfismo de contacto, de baja P/alta T, desde una facies de esquistos verdes (zona de biotita) a una facies anfíbolita I (zona de andalucita) y II (zona de sillimanita, más cerca del intrusivo). Esta transición permite proponer un intervalo de temperaturas entre 450 y $650^\circ C$ que puede interpretarse como un metamorfismo tipo Buchan (Pattison y Goldsmith, 2021). Rocas córneas de características similares han sido descritas por Gana y Hervé (1983) entre Curepto y Constitución y al sur del área de estudio, en la cordillera de Nahuelbuta, relacionadas al metamorfismo producido por el emplazamiento de intrusivos paleozoicos ("Batolito Costero", Hervé, 1988, entre otros). En este estudio no se estimaron profundidades para el evento descrito, pero podrían alcanzar entre 9-12 km, a partir de los resultados de Willner (2005) en rocas equivalentes del sur de Pichilemu (ca. $34,4^\circ S$).

La asociación mineral determinada para las rocas del Complejo Metamórfico Dóllimo (Jorquera *et al.*, 2023) es indicativa de un metamorfismo de bajo grado, facies de esquistos verdes, indicando una temperatura entre 350° - $400^\circ C$. Más al sur, en la Región del Biobío, Velásquez *et al.* (este congreso) describe los Esquistos de Quiñenco ($37^\circ S/73^\circ 07' W$), cuyos tipos litológicos (esquistos verdes, esquistos de albíta-clorita y esquistos de albíta) y mineralogía, indicarían también un metamorfismo facies esquistos verdes, pero con granate. Por otro lado, lo anterior contrasta con condiciones metamórficas registradas en otras localidades del centro-sur de Chile, donde sucesiones asignadas a la Serie Occidental del Basamento Metamórfico tienen asociaciones de minerales de alta presión, en facies esquistos azules o anfíbolitas de albíta-epidota (Willner, 2005, entre otros).

Deformación: Los datos de Jorquera *et al.* (2023) respecto de la deformación observada en el Complejo Metamórfico Las Toscas, con dos foliaciones registradas en el área (S_1 y S_2), el subsecuente plegamiento de S_0 y S_1 , así como el progresivo aumento de la deformación hacia el oeste, se ajustan, en general, a las evidencias presentadas para la Serie Oriental por Willner *et al.* (2005), Richter *et al.* (2007) y García-Sansegundo *et al.* (2023). Para el Complejo Metamórfico Dóllimo (Serie Occidental), aun cuando las observaciones son poco consistentes, se reconocieron 2 foliaciones (S_1 y S_2) y la ausencia de la estratificación original S_0 .

Si bien Jorquera *et al.* (2023) interpretan tentativamente el contacto entre ambas unidades como estructural, coincidente con un lineamiento de escala regional con rumbo NNE-SSO, esta configuración es, probablemente, resultado de una tectónica posterior. Entre los 34° y $36^\circ S$, y en función de criterios estructurales, Richter *et al.* (2007) interpretaron que la Serie Oriental es más antigua, correspondiente al área frontal de un prisma de acreción, cuyo contacto con la Serie Occidental, representativa de la acreción basal, sería transicional. A su vez, Willner *et al.* (2005) y García-Sansegundo *et al.* (2023) indicaron que la Serie Oriental es una sucesión sedimentaria asociada a una cuenca de antearco o retrocuña (e.g. Hervé *et al.*, 1988), deformada y plegada en respuesta a los esfuerzos de subducción y cabalgamiento sobre las rocas de la Serie Occidental, condicionando un contacto estructural entre ambas series.

Si bien en el área de estudio no se reconocieron evidencias al respecto, las intercalaciones subordinadas de paquetes de pizarras y filitas 'grises' con sucesiones de 'rocas verdes' en el Complejo Metamórfico Dóllimo (Serie Occidental), podrían indicar un posible engrane o contacto gradacional con sucesiones asignadas al Complejo Metamórfico Las Toscas (Serie Oriental).

Palabras Claves: Basamento Metamórfico, Región del Maule, metamorfismo de contacto, metamorfismo regional, Deformación.

Financiamiento: Este trabajo fue realizado en el marco del "Plan Nacional de Geología", proyecto de mapeo geológico a escala 1:100.000 del Departamento de Geología General, SERNAGEOMIN.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Laura Varas y Fernando Sepúlveda el aporte a las observaciones microscópicas y la revisión de la información relacionada al metamorfismo, respectivamente.

Referencias:

- Aguirre, L. 1965. In Geol. y Yac. Met. de Chile (Ruiz, C.; ed). Inst. Inv. Geol.: 6-18. Stgo.
- Aguirre, L.; Hervé, F.; Godoy, E. 1972. Krystalinikum 9: 7-19.
- Deckart, K. et al. 2014. Andean Geol 41(1): 49-82.
- Hervé, F. 1988. Ep. 11 (3): 183-188. doi: <https://doi.org/10.18814/epiugs/1988/v11i3/005>.
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C.M., Pankhurst, R.J., Navarro, J. 2020. J South Am Earth Sci. 103: 12 p. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102767>.
- Hyppolito, T., García-Casco, A., Juliani, C., Meira, V.T., Hall, C. 2014. Lithos, 206-207: 409-434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.023>.
- Hyppolito, T., Juliani, C., García-Casco, A., Meira, V., Bustamante, A., Hall, C. 2015. J Metamorph Geol 33 (9): 1003-1024. doi: <https://doi.org/10.1111/jmg.12166>.
- Gana, P., Hervé, F. 1983. Rev Geol Chile, 19-20: 37-56.
- García-Sansegundo, J., Farías, P., Gallastegui, G., Heredia, N., Cuesta, A., Rubio-Ordóñez, A., Martín-González, F., Santos-Martínez, J., Palape, C., García-Moreno, O. 2023. J South Am Earth Sci. 123, marzo 2023, 104243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104246>.
- Jorquera, R., Domagala, J. P., Villa, V., Astudillo, N. 2023. Ser. Nac. Geol. y Min., Carta Geol. Chile, N. 214, 1 mapa escala 1:100.000. Stgo. Moreno, H. 1979. Sec. Reg. Plan. y Coordinación VII Reg. Maule (Inédito): 146 p. Talca.
- Pattison, D.R.M., Goldsmith, S.A. 2021. J Geol Soc 179 (1). doi: <https://doi.org/10.1144/jgs2021-040>.
- Richter, P.P., Ring, U., Willner, A.P., Leiss, B. 2007. J Geol Soc 164 (1): 203-214. doi: <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-181>.
- Velásquez, R., Moral, J.C., Creixell, C. 2023. Este congreso. Willner, A.P. 2005. J. Petrol 46 (9): 1805-1833. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/egi035>.
- Willner, A.P., Thomson, S.N., Kröner, A., Wartho, J.-A., Wijbrans, J.R., Hervé, F. 2005. J. Petrol 46 (9): 1835-1858. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/egi036>.

Origen y metamorfismo de formaciones de hierro en el Complejo Metamórfico de Bahía Mansa (Sector Manquemapu, Los Lagos, Chile)

Guillermo Berríos Pentenero¹, Gaëlle Plissart²

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

Las formaciones de hierro presentes en el área de Manquemapu representan uno de los escasos y excepcionales afloramientos de rocas ricas en Fe observados en el Complejo Metamórfico de Bahía Mansa (CMBM), perteneciente a la Serie Occidental del paleo-prisma de acreción chileno. En esta investigación, se entregan nuevos antecedentes sobre este tipo singular de rocas, las cuales permiten caracterizar mejor la evolución tectono-metamórfica del CMBM.

Se realizó un estudio petrográfico, tanto macroscópico como microscópico, determinando las paragénesis minerales mediante microscopía óptica en luz transmitida, polarizada y reflejada, así como también análisis SEM para la identificación de óxidos de Fe. La química mineral fue determinada por SEM-EDS y microsonda electrónica. Mediante geotermobarometría convencional se obtuvieron las condiciones P-T del metamorfismo de las rocas. Por otro lado, se analizaron datos geoquímicos de roca total en elementos mayores y traza para obtener el contexto de formación de los protolitos. Finalmente, se obtuvieron edades Ar-Ar in situ en micas blancas.

Se identificaron 5 litologías: 1) Metacherts con Mn (de tipo 'cotícula'), 2) Rocas que asemejan a BIFs, 3) Meta-ironstones, 4) Esquistos con riebeckita y epidota y 5) (Blasto)milonitas de granate y anfíbol azul. La mayoría de estas rocas se encuentran en boudines métricos a decimétricos, insertos en rocas pertenecientes al CMBM. Por otro lado, los esquistos con riebeckita y epidota se observaron en el contacto entre un boudin de meta-ironstone y un esquisto verde perteneciente a la roca caja. En cada tipo litológico se identificaron 3 paragénesis: P1, P2 y post-P2, donde la paragénesis P2 representa el peak metamórfico. Con esto, se identificaron los siguientes minerales para P2: 1) Metacherts con Mn ($Qz + Grt(Sps) + Chl + Ep + Mca + Ab + Amp\ azul + Ttn + Stp + Cb + Mag + Hem$); 2) Rocas que asemejan a BIFs ($Qz + Amp\ azul + Stp + Mag + Grt + Ep + Cb + Hem$); 3) Meta-ironstones ($Grt(Sps) + Rbk + Qz + Stp + Ep + Phg + Mag + Hem + Ap + Ttn$); 4) Esquistos con riebeckita y epidota ($Ep + Rbk + Phg + Chl + Qz + Grt(Alm-Sps) + Stp + Ab + Ttn + Cb + Mag + Hem$); 5) (Blasto)milonitas de granate y anfíbol azul ($Grt + Amp\ azul + Ep$).

Con respecto a las condiciones del peak metamórfico, los metacherts presentan un máximo de temperatura de 220-380°C, a una presión estimada de 6-8 kbar. Los meta-ironstones tienen su peak a los ~375-400°C, en un rango de presión de ~8,4-15 kbar. Por último, los esquistos con riebeckita y epidota presentan un peak metamórfico a ~350°C, a una presión de ~9,9-15,1 kbar. Los datos geoquímicos de roca total indican un origen mixto hidrotermal-hidrogenético, probablemente asociado a una cuenca de trasarco. La precipitación estaría vinculada a fluidos de alta temperatura (>250°C), observándose una mezcla con aguas marinas. La presencia significativa de Al indica mezclas con sedimentos continentales de fondo oceánico.

Resultados de datación Ar-Ar in situ en micas blancas del esquisto con riebeckita y epidota indican 3 rangos de edad: ~300 Ma, ~260-280 Ma y ~250-230 Ma. La primera edad está poco presente, y se interpreta como relictos de cristalización de mica blanca cuando estas litologías alcanzaron su peak a profundidades de hasta 45 km. La segunda edad es dominante, y está asociada a recrystalizaciones debido a un movimiento de exhumación por flujo de retorno en el canal de subducción; esto se observa tanto a escala macroscópica como microscópica en el boudin de meta-ironstones y su esquisto caja. Finalmente, la tercera edad da cuenta de recrystalizaciones ocurridas cuando las rocas ricas en Fe se habrían emplazado en la base del prisma de acreción y durante su posterior evolución dentro del prisma, sufriendo, a partir de este momento, una historia tectono-metamórfica similar al CMBM.

Palabras Clave: Metamorfismo de subducción, Meta-BIF, Boudinage, Ar-Ar, Depósito hidrotermal oceánico.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el Proyecto Fondecyt Iniciación 11150635, así como también por el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad Austral de Chile.

Agradecimientos: El autor agradece a la Dra. Gaëlle Plissart por el acompañamiento recibido en este estudio, así como también a los profesores Dr. Pablo Sánchez-Alfaro y Javier Maturana.

Identificación y descripción de fases mineralógicas indicativas de metamorfismo de bajo grado en la Formación La Lajuela, Chile central

Álvaro Carrizo Reyes¹⁻², Francisco Fuentes Iza³, Christian Salazar Soto⁴

- (1) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. La Plaza 680, Santiago, Chile
 (2) Universidad Bernardo O'Higgins, Magister Ciencias Químico-Biológicas, Ciencias de la Salud, Av. Viel 1497, Santiago, Chile
 (3) Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Bellavista 7, Santiago, Chile
 (4) Universidad Mayor, Carrera de Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

Formación La Lajuela es una sucesión volcano-sedimentaria, de 3600 m de espesor, Jurásico-Cretácica, con dominancia de facies sedimentarias marinas intercaladas facies volcánicas y volcanoclásticas subacuáticas a subáreas. De base a techo, se puede dividir en 3 miembros denominados: Santa Inés, Punta Áspera y La Cantera (Bravo, 2001; Zúñiga, 2017; Carrizo, 2021).

El objetivo de este trabajo es identificar fases minerales secundarias indicativas de metamorfismo de bajo grado de la Fm. La Lajuela para aportar a la discusión sobre mecanismos de metamorfismo en cuencas extensionales mesozoicas. La sección estudiada, La Mina, se ubica al suroeste de Santa Cruz y tiene un espesor de 1042 m.

Miembro Santa Inés: lutitas en la base presentan crecimiento de minerales arcillosos en matriz (interestratificados de illita-esmectita), desarrollando una fábrica anastomosada (S_0) paralela a la laminación de la roca y un leve desarrollo de fábricas oblicuas (S_1). En plagioclasas detríticas se observa el crecimiento de interestratificados de clorita-esmectita, albita y cuarzo, ocasionalmente orientado en S_1 . Litofacies arenosas sin presencia de carbonatos, presentan crecimiento de zeolita en poros, junto a albita, cuarzo e interestratificados clorita-esmectita. En algunos de estos poros, existe crecimiento de microcristales de epidota. Litofacies arenosas con presencia de carbonato, presentan escaso desarrollo de fases secundarias, sin embargo, cristales de carbonatos exhiben el desarrollo de maclados gruesos y rectos, correspondiente a maclas de calcita tipo II. Se identifican bordes saturados entre clastos feldespáticos y de cuarzo. Litofacies calcáreas exhiben cristales de cuarzo, posibles vermiculitas e interestratificados clorita-esmectita en matriz y clastos. Se identifican maclas de calcita de tipo II tanto en fósiles como en matriz y cemento, además de microestiolitos. En base a lo anterior, se estiman temperaturas entre 180 y 230°C para este miembro, con facies de anchizona baja y facies de zeolita (Frey & Liou 1991; Schmidt *et al.* 1997; Merriman & Peacor 1998).

Miembro Punta Áspera: brechas andesíticas en la base presentan crecimiento de calcita con desarrollo de maclas de tipo II, clorita y epidota tanto en poros como cristales de plagioclasa. Litoarenitas volcánicas sobreyacentes, presentan crecimiento de epidota e interestratificados clorita-esmectita en poros y detritos. En autobrechas andesíticas y andesitas hacia el techo, crecen pumpellyitas en piroxenos, titanitas esféricas y epidota en masa fundamental y plagioclasas, interestratificados clorita-esmectita y prehnita en poros y vetillas (este último es un evento posterior). En base a los minerales, se asocian rangos de temperatura entre los 200 y 300°C con facies prehnita-pumpellyita (Frey & Liou 1991).

Miembro La Cantera: areniscas sin carbonatos en la base presentan crecimiento de zeolita en poros, con crecimiento de pequeños cristales de epidota. En niveles volcánicos dominan carbonatos como reemplazo de plagioclasa, con leve desarrollo de maclas de calcita tipo II. En litofacies calcáreas y mixtas, se observan maclas de calcita tipo II, que tienden a ser más finas en comparación a las del miembro Santa Inés. Lutitas en el techo presentan escaso desarrollo de minerales arcillosos, con leve crecimiento de posibles zeolitas en poros. Las fases minerales son indicativas de temperaturas menores a 200°C en facies de diagénesis tardía y zeolita (Frey & Liou 1991; Merriman & Peacor, 1998).

Las fases minerales secundarias, demuestran un fuerte control litoestratigráfico, alcanzando las mayores temperaturas en los miembros inferiores. La presencia de carbonatos inhibe el crecimiento de aluminosilicatos en facies volcánicas producto de la presión de CO_2 . Maclas de calcita permiten la determinación de temperaturas entre los 150 y 300°C en litologías con poco desarrollo de minerales secundarios (Burkhard 1993).

Se propone que el metamorfismo de la Fm. La Lajuela fue dominado, inicialmente, por un incremento de temperatura, generando facies de zeolita e incipiente prehnita-pumpellyita en litofacies sedimentarias del miembro Santa Inés, generando deformación intracrystalina en carbonatos, además, de un metamorfismo temprano en el miembro Punta Áspera, asociado a la reactivación volcano-tectónica de la cuenca. La temperatura disminuye hacia el techo relacionado a la dominancia sedimentaria. El constante aumento en la presión litostática, forma fábricas S_0 en lutitas de la base. Las leves foliaciones S_1 se pueden asociar al evento de inversión de la cuenca. La trayectoria P-T-t en sentido antihorario es correlacionable a metamorfismo diastático (Robinson & Beavins 1989), distinto al de enterramiento asociado a sucesiones contemporáneas en Chile Central como la Fm. Lo Prado.

Palabras Clave: Metamorfismo Diastático, Anchizona, Metamorfismo de enterramiento, Cuencas Jurásico – Cretácicas.

Agradecimientos: A los colegas Francisco Zúñiga por la recopilación de muestras y cortes transparentes que la base del estudio y a Mauricio Calderón, Beatriz Ponce, Andrés Escare por revisiones.

Referencias:

- Bravo, P. (2001). Geología del Borde Oriental de la cordillera de la costa entre los Ríos Mataquito y Maule, VII región. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Burkhard, M. (1993). Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of structural geology*, 15(3-5), 351-368.

- Carrizo, A. (2021). Estratigrafía y Metamorfismo de bajo grado en la formación La Lajuela (Jurásico Superior – Cretácico Inferior): análisis de las variaciones mineralógicas y su relación con la estratigrafía en los sectores de San Vicente de Tagua Tagua y Santa Cruz. (Memoria de Título, Universidad Del Desarrollo, Facultad de Ingeniería: 177p. Santiago).
- Frey, M., Capitani, C. D., & Liou, J. G. (1991). A new petrogenetic grid for low-grade metabasites. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(4), 497-509.
- Merriman, R. J., & Peacor, D. R. (1998). Very low-grade metapelites: mineralogy, microfabrics and measuring reaction progress. In *Low-grade metamorphism*, 10-60.
- Robinson, D., & Bevins, R. E. (1989). Diastathermal (extensional) metamorphism at very low grades and possible high-grade analogues. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1), 81-88.
- Schmidt, D., Schmidt, S. T., Mullis, J., Maëhlmann, R. F., & Frey, M. (1997). Very low-grade metamorphism of the Taveyanne formation of western Switzerland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129(4), 385-403.
- Zúñiga Molina, F. I. (2017). Estratigrafía del jurásico superior-cretácico inferior, en la cordillera de la costa (entre 34°37'S-34°41'S): La Lajuela-Santa Cruz (Memoria de Título, Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería: 160p. Santiago).

Metamorfismo medio-alto en gneises de los Andes norpatagónicos (~43°20 S): evidencias del rol del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui en la exhumación

Israel Donoso Arenas¹, Jeremy Monje¹, Mauricio Calderón², Francisco Hervé¹⁻³

(1) Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, República 252, Santiago, Chile.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo, Av. Casa 680 Las Condes, Santiago, Chile.

(3) Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza de Ercilla 803, Santiago, Chile.

La Provincia de Palena cuenta con registro de rocas metamórficas que abarcan un amplio rango de edades que van desde el Paleozoico al Cenozoico. En general representan un importante desafío y oportunidad para contribuir al conocimiento de la evolución geológica de este territorio, debido a la diversidad de composición de sus protolitos y el diferente grado de metamorfismo alcanzado. Rocas de alto grado metamórfico se han encontrado en las trazas principales y/o subsidiarias del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO). A continuación, se presentan resultados obtenidos de afloramientos próximos a la traza principal del SFLO, específicamente en la ladera oriente del Valle Ventisquero El Amarillo dentro del Parque Nacional Pumalín y en el sector Mirador Lago Yelcho, en parte del Parque Nacional Corcovado. En este trabajo se presentan datos inéditos de petrografía, análisis semi-cuantitativos de química mineral obtenido mediante Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y reconocimiento de fases minerales con Difracción de Rayos X (DRX). La información generada en terreno y laboratorio permiten considerar implicancias tectónicas.

Un gneis de biotita-sillimanita-granate (TC-21), recolectado en las cercanías del Ventisquero El Amarillo, con un índice de color leucocrático, presenta un bandeamiento gneísico que representa la foliación principal (135/63). La asociación mineralógica es: cuarzo + plagioclasa + feldespato potásico + biotita + sillimanita + cordierita + granate + muscovita; la última es de carácter retrógrado. La asociación mineralógica permite ubicar esta roca en el campo de estabilidad del rango de temperaturas entre 550°C y 750°C, en tanto el grado metamórfico correspondería a la facies anfibolita en transición a granulitas de alta temperatura y baja presión.

Los afloramientos de gneises de la zona se agrupan dentro de la unidad basamento metamórfico Paleozoico (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995). Por su parte, el gneis (muestra TC-21) se encuentra cercano a los gneises de Termas del Amarillo, en los cuales Hervé *et al.*, (2016) han determinado que estos son cortados por diques de granito de edad Tortoniana y que presentan bordes de sobrecrecimiento metamórfico en circones (cf. Calderón *et al.* 2016), que registran una edad de ca. 10 Ma. Considerando una profundidad de metamorfismo del orden de 2 km como mínimo, la tasa promedio de exhumación de estas rocas habría sido de aproximadamente 0.2 mm/año, que de acuerdo a la literatura corresponde a una velocidad moderada a rápida. En caso de que la profundidad haya sido mayor, del orden 6 km, la tasa de exhumación sería de ca. 0.5 mm/año, que es muy rápida. Lo anterior puede relacionarse con la actividad del SFLO a fines del Neógeno.

Palabras Clave: Andes norpatagónicos, Metamorfismo medio-alto, Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui, Exhumación, Gneises.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT N°1180457 (ANID) y Proyecto de Exploración N°13220141 (ANID).

Agradecimientos: Al equipo de la "Travesía Corcovado".

Referencias:

- Calderón, M; Hervé, F; Fanning, M; Pankhurst, R; Fuentes, F (2016). Chemical variations of Miocene igneous and metamorphic zircons from the contact aureole of the north Patagonian batholith, 10th SSAGI, Puerto Vallarta, México.
- Donoso, I. (2023). Reconocimiento Morfoestructural y Petrográfico del área Chaitén-Villa Santa Lucía (42°40-43°30S), Región de Los Lagos, Chile, Memoria de Título, Universidad Andrés Bello, 100, Santiago.
- Hervé, F; Calderón, M; Fanning, M; Pankhurst, R; Fuentes, F; Rapela, C; Marambio, C. (2016). Devonian magmatism in the accretionary complex of southern Chile. *Journal of the Geological Society*, 173(4), 587-602.
- Monje, J. (2022). Estudio de Rocas Metamórficas y un Cuerpo Serpentinítico en el Sector El Amarillo – Lago Yelcho, Chiloé Continental, Región de Los Lagos, Chile. Memoria de Título, Universidad Andrés Bello, 153, Santiago.
- SERNAGEOMIN & BRGM (1995), Carta Metalogénica X Región Sur, Chile.

Origin of the mafic and ultramafic mylonitic rocks at the base of the Taitao Ophiolite, Aysén Chile

Emilio González Valenzuela¹, Gaëlle Plissart², Manuel Schilling², Alexandre Corgne², Kuan-Yu Lin³, Norikatsu Akizawa⁵, Cecile Prigent⁴, Jessica Warren³, Maite Alvear¹, Catalina Marín¹, Ana Rivera¹

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (3) Universidad de Delaware, Institute of earth science, Delaware, United States
 (4) IPGP, París, Francia
 (5) The University of Tokyo, Kashiwa, Tokyo, Japón

The Taitao ophiolite (46°40' S, 75°30' W) is located close to the Chilean triple junction. From south (base) to north (top), the ophiolite displays a complete sequence of Penrose – type oceanic lithosphere. Despite being the youngest ophiolite on Earth (~5.6 Ma, Anma et al. 2006) and, potentially, one of the least affected by later tectonic processes, remote access and dense vegetation make its study difficult. So far, no detailed investigation dedicated to its emplacement onto the continental crust has been carried out. Suggested emplacement models include: (i) tectonic underplating with westwards vergence (Lagabriele et al. 2000), (ii) buoyancy-induced uplift of the subducted ridge itself (Veloso et al. 2005; 2007) and (iii) strict obduction with eastwards vergence (Bourgeois et al. 2016).

To better understand the emplacement of the Taitao ophiolite, we carried out fieldwork during the summer of 2022. We sampled a diversity of ultramafic units from the southern part of the ophiolite, which consist of moderate to fully serpentinized harzburgites, dunites, lherzolites, wehrlites and occasional clinopyroxenites, frequently cut by late pegmatitic gabbro dykes. In the southernmost part of the ophiolite, between the aforementioned ultramafic units and the Cabo Raper granitoid (3.92 ± 0.07 Ma, (Anma et al. 2009)), we recognized two aligned kilometric lenses of strongly mylonitized ultramafic and mafic rocks. These lenses were previously described as tectonites (Nelson et al. 1993) and, given their alignment, as being parallel to a N140 dextral strike – slip fault separating the Cabo Raper pluton from the ophiolite (Lagabriele et al. 2000). We performed a macrostructural study along the deformed area and collected oriented samples from 24 sites. The samples were cut along the XZ plane of the strain ellipsoid to identify kinematical criteria. These criteria were then associated to a specific paragenesis identified from microscopic observations and SEM-EDS analyses.

The mylonitic zone contains the following lithologies: metagabbros, metagabbroanorites, metatroctolites, metaharzburgites and metadunites. All were strongly transposed into the same deformation plane, producing a banded appearance. Mean foliation is N170/82 (n=31), oblique to the N140 contact with the Cabo Raper pluton, and mean stretching lineation is N189/45 (n=27). Folds with axis parallel to the stretching lineation were also observed. The metagabbroids and metaperidotites are intruded by leucogranitic lenses, which are also ductilely deformed. Furthermore, late brecciated serpentinites are exposed at the borders of the mylonitic zone. In the metaperidotites, relict zones devoid of serpentinization overprint allow us to characterize the paragenesis linked to mylonitic deformation. Metaharzburgites display orthopyroxene and clinopyroxene porphyroclasts embedded in an ultrafine matrix composed of neoblasts of plagioclase, olivine, clinopyroxene and orthopyroxene. Metagabbros and metatroctolites display a moderate to strong mineral segregation producing foliated layers of alternating anorthite and olivine-clinopyroxene. The metagabbros show pyroxene porphyroclasts with well-developed recrystallization tails forming sigma and delta structures, which indicate dextral movement. It is worth noting that no hydrated minerals were observed in the mylonitic lithologies.

Our preliminary results indicate that the base of the ophiolite corresponds to a high-temperature deformation zone, probably developed from peridotitic and gabbroic protoliths similar to those observed immediately to the north of the mylonitic zone. Whole-rock analyses are currently underway to fully compare the mylonitic protoliths with these undeformed rocks from the same ophiolite. Also, the unusual lack of hydrated minerals in the mylonitic rocks points to a very high-temperature deformation event. To determine the P-T conditions at which the mylonitization occurred, we will perform geothermobarometry calculations based on the major and trace element contents of the neoblasts. High P-T deformation conditions would probably indicate that the mylonitic zone corresponds to a basal detachment zone developed at mantle depths when the ridge subducted. Meanwhile, the marginal serpentinitic brecciated zones are interpreted as being produced by a late, dextral event, probably responsible for juxtaposing the Cabo Raper granitoid with the ophiolite, along the preexisting mylonitic weak zone. Whole-rock and U-Pb dating of zircons from the deformed granitic lenses of the mylonitic zone is currently underway. It will provide a minimum age for the mylonitic deformation and help better constrain the regional evolution.

Palabras Clave: Taitao ophiolite, High - T mylonitic rocks, Geothermobarometry, Ophiolite emplacement.

Financiamiento: This study was financed by FONDECYT regular 1211820 and VIDCA MUJ-INV-2023-04.

Referencias:

- Lagabriele, Y., Guivel, C., Maury, R., Bourgeois, J., Fourcade, S., Martin, H. 2000. Magmatic– tectonic effects of high thermal regime at the site of active ridge subduction: the Chile Triple Junction model. *Tectonophysics*, 326(3-4), 255-268.
- Nelson, E., Forsythe, R., Diemer, J., Allen, M., Urbina, O. 1993. Taitao ophiolite: A ridge collision ophiolite in the forearc of southern Chile (46 S). *Andean Geology*, 20(2), 137-165.
- Veloso, E. A. E., Anma, R., Yamazaki, T. 2005. Tectonic rotations during the Chile Ridge collision and obduction of the Taitao ophiolite (southern Chile). *Island Arc*, 14(4), 599-615.
- Neloso, E. E., Anma, R., Ota, T., Komiya, T., Kagashima, S. I., Yamazaki, T. 2007. Paleocurrent patterns of the sedimentary sequence of the Taitao ophiolite constrained by anisotropy of magnetic susceptibility and paleomagnetic analyses. *Sedimentary Geology*, 201(3-4), 446-460.
- Bourgeois, J., Lagabriele, Y., Martin, H., Dymant, J., Frutos, J., Cisternas, M. E. 2016. A review on forearc ophiolite obduction, Adakite-like generation, and slab window development at the Chile triple junction area: uniformitarian framework for spreading-ridge subduction. *Pure and Applied Geophysics*, 173(10), 3217-3246.

Caracterización geológico-estructural del complejo metamórfico andino oriental en el brazo poniente del Lago O'Higgins (~48.7°S), Región de Aysén, Chile

Paula Hernández Torres¹, Manuel Suárez Dittus²

(1) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, República 239, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Avda. Valparaíso 1530, Viña del Mar, Chile

El margen occidental de Sudamérica en Patagonia durante el Paleozoico se caracterizaba por ser un régimen convergente de subducción (Ramos *et al.*, 1986), sin embargo, al sur de los 40°S el régimen ha sido ambiguo ya que se ha propuesto como margen pasivo (Yoshida, 1981), mixto (Lacassie, 2001), de subducción (Hervé *et al.*, 2003) hasta progresivo de margen pasivo a activo con el inicio de subducción durante el Carbonífero tardío - Pérmico (Augustsson y Bahlburg, 2003). El basamento más extenso de la Patagonia que data de esta era, es el Complejo Metamórfico Andino Oriental/Eastern Andes Metamorphic Complex (CMAO o EAMC Hervé *et al.*, 1999) el cual se sitúa en la zona central de la cordillera patagónica entre los ~46°-50°S aflorando tanto en Chile como Argentina. Este complejo incluye rocas principalmente metasedimentarias, con intercalaciones de metabasitas metamorizadas a la facies de esquistos verdes, fuertemente deformadas y de edades Carboníferas o anteriores (De la Cruz y Suárez, 2006) y de algún periodo entre el Pérmico y el Jurásico Superior, como lo indican dataciones U-Pb en circones detríticos (Hervé *et al.*, 1999) con relaciones de contacto con rocas del Jurásico Superior. Sin embargo, estas rocas de diferentes edades aún no han podido ser diferenciadas en base a su litología o estructura. En este resumen se dará a conocer un estudio de reconocimiento hecho en rocas del CMAO expuestas en la ladera norte del Brazo Poniente del lago O'Higgins, en la Región de Aysén, Chile. En la zona de estudio afloran principalmente metapelitas y metareniscas, lavas almohadilladas han sido reportadas a 6 km al oeste de la localidad estudiada (De la Cruz *et al.*, 2004). Se reconocen 4 etapas de deformación principales, tres de ellas dúctiles y una frágil. La primera etapa de deformación se caracteriza por el desarrollo de boudins y pinch-and-swell en niveles de metarenisca de forma localizada, disrupción estratigráfica formada por bloques de metarenisca en matriz de metapelita descritas como broken formation, la matriz metapelítica exhibe foliación incipiente (S_1) con planos paralelos a las capas de metarenisca. La segunda etapa deformativa está caracterizada por foliación penetrativa principal en metapelitas y clivaje de plano axial asociado a pliegues isoclinales y apretados, pliegues armónicos y disarmónicos, ambas superficies (S_2) se exhiben paralelas entre sí indicando que se generaron bajo esfuerzos compresivos con orientación NE-SW y NNE-SSW. Además, se observaron boudins sigmoidales de metarenisca paralelos a la foliación entre capas metapelíticas en flancos de pliegues indicando cizalle por deflexión entre las capas durante la compresión (Fossen, 2010), también se observaron pliegues en vaina los cuales se pueden asociar a deformación de cizalle simple entre capas. La tercera fase deformativa se caracteriza por clivaje de plano axial S_3 subordinado en pliegues chevron, en cofre, monoclinales además de clivaje de crenulación generando micropliegues con planos axiales perpendiculares a oblicuos con respecto a la foliación principal indicando deformación compresiva dúctil con esfuerzos NW-SE. Además, se observó de forma localizada que la foliación principal estaba cortada por fallas con pliegues de arrastre. La última fase deformativa se asocia a fallas de rumbo NE-SW que cortan de forma recta y neta a las estructuras descritas en las fases deformativas anteriores, también se consideran los lineamientos observados a escala satelital con orientaciones preferenciales E-W durante esta etapa. La facies de alternancia de metapelita con metarenisca que predomina en el área estudiada se dispone en contacto tectónico con metabasitas observadas a 1 kilómetro de las lavas almohadillas descritas por De la Cruz *et al.* (2004), el contacto se describe como una falla con desplazamiento sinistral, donde en la proximidad al plano de falla se observa mezcla de estas facies indicando un mélange. Por otra parte, se observaron rocas volcanosedimentarias que sobreyacen al CMAO las cuales pueden correlacionarse con la 'Asociación sedimentario-volcánica basal bien estratificada' (a_1) de la Formación Ibáñez (Niemeyer, 1975) aportando nueva información sobre la geología del sector.

Palabras Clave: tectónico, deformación, metamórfico, estructuras, foliación.

Financiamiento: Dir. Enrique Zamora Instituto Chileno de Campos de Hielo (ICCH) Subprograma Ciencia Joven 2020 Dr. Manuel Suárez Dittus. Proyecto FIC Aysén BIP 40000501-0 2020.

Agradecimientos: Agradezco a mi familia por su amor y apoyo incondicional, a Enrique y Fernanda del ICCH por hacer esta hermosa investigación posible y a Juan Inzunza por motivarme día a día con este desafío.

Referencias:

- Augustsson, C., Bahlburg, H., 2003. Active or passive margin? Geochemical and Nd isotope constraints of metasediments in the backstop of a pre-Andean accretionary wedge in southernmost Chile (46°30'-48°30'S). Geological Society, Special Publications.
- De la Cruz, R.; Welkner, D.; Suárez, M.; Quiroz, D. 2004. Geología del Área Oriental de las Hojas Cochran y Villa O'Higgins, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile.
- De la Cruz, O., Suárez, M. 2006. Geología del Área Puerto Guadal-Puerto Sánchez, Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 8-11 p.
- Fossen, H. 2010. Structural Geology. Cambridge University Press, New York. 237p.
- Hervé, F., Aguirre, L., Sepúlveda, V. y Morata, D. 1999. Contrasting geochemistry and metamorphism of pillow basalts in metamorphic complexes from Aysén, S. Chile. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 12.
- Hervé, F., Fanning, C.M., Pankhurst, R.J., 2003. Detrital Zircon Age Patterns and Provenance in the metamorphic complexes of Southern Chile. Journal of South American Earth Sciences, 16, 107-123 p.
- Lacassie, J.P. 2001. Geología del interfluvio Baker-Bravo (47°30'48"S), Aysén, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago. 111 p.
- Niemeyer, H. (1975). Geología de la región comprendida entre el lago General Carrera y el río Chacabuco, Provincia de Aysén, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, p. 309.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortés, J., Palma, M., 1986. Paleozoic terranes of the central Argentine Chilean Andes. 855-880p.
- Yoshida, K. 1981. Estudio geológico del curso superior del Río Baker, Aysén, Chile (47°05' a 47°42'S, 72°28' a 73°15'W). Tesis Ph.D. (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 341 p.

Eventos de deformación del basamento metamórfico paleozoico entre los 36°45'-37°10' (Provincia de Concepción, Chile)

Juan Carlos Moral¹, Ricardo Velasquez², Christian Creixell², Verónica Oliveros¹, Annasethe Marquez¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

El basamento metamórfico del paleozoico tardío en Chile (33-42°S) exhibe características típicas de cinturones metamórficos pareados en dirección N-S. Se divide en un ambiente de paleo zona de subducción con una alta relación P/T (Serie Occidental) y de retrocuña y/o antearco con baja relación P/T (Serie Oriental) [1]. La Serie Oriental presenta litologías intercaladas de metapelitas (filitas-pizarras) y metapsamitas cuyo protolito proviene de sedimentos turbidíticos devónicos a carboníferos que rellenan la fosa en un contexto de margen pasivo bajo un ambiente marino cercano al continente (1-3). Por otra parte, la Serie Occidental se compone de metaareniscas, esquistos psamo-pelíticos intercalados con metabasitas, metacherts ricos en Fe-Mn, sulfuros masivos y peridotitas serpentinizadas [1,4]. La Serie Oriental posee un régimen de acortamiento horizontal o acreción frontal de sedimentos al margen, mientras que la Serie Occidental se encuentra asociada a un acortamiento vertical y basal [1,4]. El contraste entre ambos estilos de deformación genera un debate sobre la naturaleza del contacto, con propuestas de un contacto transicional y/o tectónico [1,11]. A lo largo del texto se utilizan las nomenclaturas minerales de Whitney y Evans (2010) [2,5].

Contexto Geológico

Los eventos de deformación se dividen comúnmente en 3 etapas (D1,2,3). El evento D1 en la Serie Occidental en general se registra en micaesquistos con porfiroblastos de Ab pre-sin S₂ como inclusiones de grafito microplegadas isoclinalmente (relictas de una foliación S₁) y pliegues en vaina con ejes de pliegue paralelos a la dirección de transporte F₂ y L_{2e} (estiramiento) en sentido E-O [4]. En el área de estudio, la Serie Occidental se reconoce en las localidades de Quiñenco, Escuadrón y península de Hualpén con litotipos de esquistos verdes y micaesquistos de Ab+Chl±Gt con porfiroblastos de Gt pre-S₂ [6,7]. El evento D2 se encuentra vinculado a la acreción basal de sedimentos y presentan una foliación subhorizontal S₂ con pliegues recumbentes apretados e intrafoliales y estructuras de cizalla simple [1]. A nivel local D2 se observa en la península de Hualpén presentando una foliación S₂ con rumbos NE a SO afectados por un plegamiento regional NO-SE [6], mientras que en la Unidad Esquistos de Quiñenco posee orientaciones S₂ con rumbos NE-SO [7]. En general, en la Serie Occidental rumbos NO-SE con L_{2/3} buzando al NO o SE [4,8] se han descrito como eventos D3 producto de la rotación de S₂ debido a una transpresión dextral [9]. A nivel local el evento D3 local posee estructuras frágil-dúctil y pliegues tipo kink con orientaciones NE-SO [2,6]. Finalmente, se ha descrito un evento D4 asociado a fallas normales e inversas N-S y E-O como también pliegues verticales en similares orientaciones afectando la Serie Occidental [4].

La Serie Oriental registra litologías con evidencia o no de neocrystalización producto del metamorfismo de contacto [2]. La Unidad Patagual-El Venado [10] son metapsamopelitas de muy bajo grado que conservan estructuras sedimentarias, sin porfiroblastos asociados al metamorfismo de contacto (Fig.1 y 2G). Por otra parte, las secuencias asociadas a metamorfismo de contacto presentan litotipos como filitas, pizarras, esquistos, y gneisses. En el área de estudio se ha registrado una zona de Bt en playa Laraquete y San Pedro de la Paz con porfiroblastos de Bt pre-sin S₂. Desde playa Colcura hasta Chivilingo Norte, se reconoce la zona de St-And, con porfiroblastos de And post-S₂ tipo quiazolita y de Bt-St-Gt pre-S₂. La zona de And en Mintrihue-Palco (Fig.1) no presenta St y posee rocas corneanas de Bt-Chl con And pinnitizada [2,6].

En Laraquete y Colcura, la zona de Bt y St-And presentan rocas calcosilicatadas con texturas granoblásticas en forma de boudinage y paralelas a S₀. Estos litotipos poseen asociaciones minerales de Qz+Zo+Czo+Gt+Act+Chl+Pl+Bt y ±Cal±Mg±Op [2,6]. Estudios previos han propuesto que la isograda de St exhibe una distribución oblicua NO-SE en el área de Colcura [2], donde a la fecha existen dos posibles explicaciones. En primer lugar, la distribución de la St es controlada por la composición del protolito con altos contenidos de CaO que se encuentran intercalados con rocas calcosilicatadas [2,6]. Una segunda propuesta considera que la isograda de St es paralela a estructuras sin-D1 asociada a una convergencia en sentido NE-SO [2] producto de un metamorfismo barroviano a ~650°C/9 kbar previo al metamorfismo tipo buchan [6].

El evento D1 en el área es determinado por la ausencia de S₂ sobreimpuesta y pliegues inclinados de rumbo NO-SE a NNO-SSE en Isla Quiriquina [2]. Orientaciones similares se han descrito en pliegues subverticales NNO-SSE [11] y pliegues recumbentes de rumbo ~ENE [8]. Durante el evento D2 en general se describen pliegues inclinados a recumbentes con orientaciones NO-SE vergentes al SO (8) y orientaciones NE-SO con vergencia al SE [9]. A nivel local S₂ se reconoce en planos axiales de pliegues recumbentes a inclinados entre las playas de Colcura y Chivilingo con rumbos NNE-SSO/32°E y NE-SO, mientras que en Playa Laraquete y Chivilingo sur existe un cambio en la disposición de rumbos NO-SE con pliegues inclinados vergentes al SO [2,6].

Finalmente, el contacto entre ambas series en el área se interpreta por falla NNE-SSO, donde la Serie Occidental aflora en la península de Tumbes y debajo de rocas sedimentarias terciarias en la península de Arauco según perforaciones de la ENAP [2]. Ante la evidencia de metabasitas en la Unidad Esquistos de Quiñenco [7] ~6 km al E del contacto propuesto [2], el presente trabajo realiza un análisis estructural preliminar del basamento entre los 36°45'-37°10'. Esto con el objetivo de evaluar la deformación durante los procesos de exhumación de la Serie Occidental e implicancias en la distribución en las isógradas de zonas minerales.

Resultados preliminares:

Eventos de deformación en la Serie Occidental: Se reconoce en los dominios: península de Hualpén, y Coronel-Quíñenco. Posee litologías de micaesquistos con asociaciones minerales de Ab+Gt+Mb+Chl y esquistos verdes con Ab+Mb+Chl+Czo+Zo+Amph ±Sph±Cal±Py±Stp y texturas porfirolepidoblástica a lepidoblástica.

Fig. 1

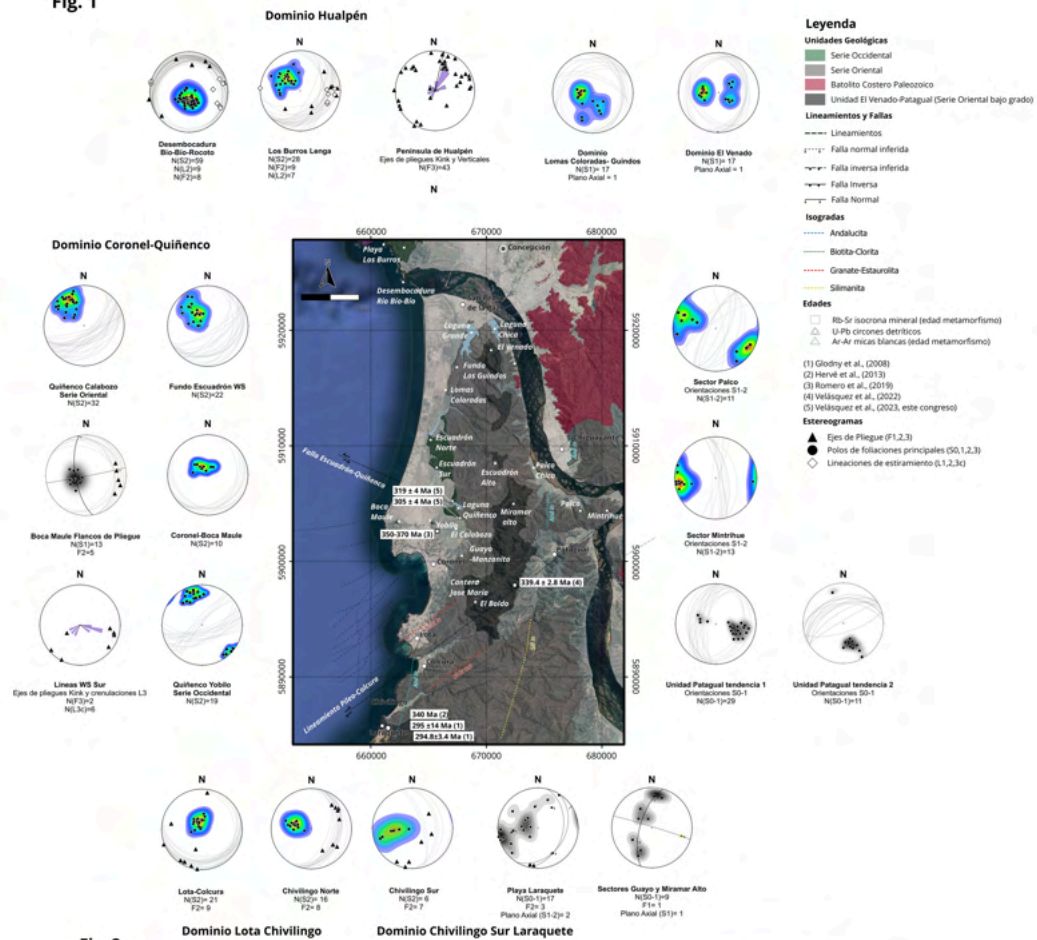


Fig. 2

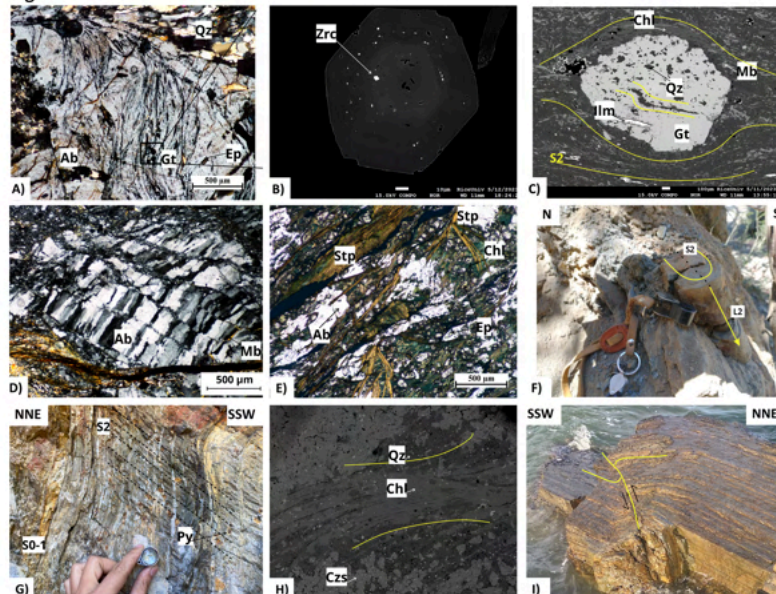


Figura 1. Área de estudio Provincia de Concepción. Estereogramas con foliaciones S_{0-1}, S_2 y ejes de pliegue $F_{1,2,3}$. **Fig. 2.** **A)** Ab pre- S_2 con trails de grafito formando isoclinales apretados asociados a evento D1 con inclusiones de Gt y Ep. Sector Escudrón **B)** Gt zonado con inclusiones de circones en núcleo. **C)** Porfiroblastos de Gt syn S_2 en micaesquisto encontrado en la Península de Hualpén. Estructuras asociadas a cizalla simple con inclusiones de Qz, Ilm y una matriz de Chl y Mb deflectada. **D)** Cataclasita afectando porfiroclasto de Ab con matriz de Mb ubicada en Laguna Quiéncho. **E)** Stp acicular post D2 en matriz de Ab-Chl en Boca Maule **F)** Pliegue apretado con eje de pliegue paralelo a dirección de buzamiento S_2 . **G)** Metapsamopelitas de bajo grado con porfiroblastos de Py y sobreimpresión de S_2 en El Guayo. **H)** Fábrica SC dextral afectando Chl en roca calcosilicatada de Chivilingo. **I)** Pliegue por propagación de falla con movimiento sinistral D3 afectando metapsamopelitas de Colcura.

La presencia de esquistos verdes sólo se ha encontrado en los sectores de Quiñenco, Boca Maule y como bloques en los Chiflones Schwager (Fig. 1).

En Escuadrón Sur y Calabozo el evento D1 es determinado en micaesquistos de $Ab+Chl\pm Gt$ con porfiroblastos de Ab pre-sin S_2 e inclusiones de grafito que forman micropliegues isoclinales $F1$ como foliación relicta S_1 (Fig. 2A). Siguiendo la foliación S_1 relicta se observan inclusiones de Gt zonados y Zrn (Fig. 2B). Se reconocen 3 tendencias en las foliaciones S_2 : NE-SO; NNE-SSO; ENE-OSO. En el Dominio Hualpén, la foliación S_2 posee rumbos NE-SO/10-30° SE en Playa Los Burros y ENE-OSO/15° N en la Desembocadura del Río Bío-Bío y Playa Rocoto. Los ejes de pliegues recumbentes $F2$ buzando ~10° al NE y SO y lineaciones de estiramiento en Qz ~10-20°E. Este Dominio posee porfiroblastos sin- S_2 de Gt y evidencias de cizalla simple (Fig. 2C). En el Dominio Coronel-Quíñenco, los sectores Maule y Escuadrón presentan orientaciones S_2 NE-SO/20-30°SE, mientras que en Quiñenco-Calabozo, cerca del contacto con la Serie Oriental, el manteo aumenta a ~60° al SE y SSE con orientaciones S_2 de rumbo ENE-OSO. En Fundo Escuadrón las orientaciones S_2 poseen rumbos NE-SO/~20° SE y algunas variaciones NNE-SSO.

El evento D3 se registra en estructuras frágil-dúctil. La península de Hualpén posee foliaciones S_3 sobrepuestas a S_2 con orientaciones ~NO-SE/20°NE. Al sur en Laguna Quiñenco se identifican cataclásitas en micaesquistos de $Ab-Chl$ (Fig. 2D) con orientaciones ~N30°E/40°SE y fábricas S-C inversas en Calabozo que cortan la S_2 principal con orientaciones similares. En el área de Boca Maule las asociaciones minerales de esquistos verdes presentan estilpnomelano acicular post-D2 (Fig. 2E) asociado a Ab elongada en cinta en un pliegue de arrastre. Destaca la presencia de fallas de alto ángulo en el Dominio Coronel-Quíñenco de orientaciones ENE-OSO a NE-SO/~80°SE. En este dominio las lineaciones de crenulación ($L3c$) buzando 62° SO (Calabozo) y 10°SO (Boca Maule) siendo paralelas al S_2 principal NE-SO en micaesquistos con granate de Yobilo. Por otra parte, se reconocen ejes de pliegues $F3$ tipo kink y pliegues verticales armónicos en sentido buzando 10° NNE y E-O buzando 10° al E en ambos dominios.

Eventos de deformación en la Serie Oriental: Se identifican secuencias de metapsamopelitas de muy bajo grado sin porfiroblastos que conservan estructuras sedimentarias y Py asociada al protolito (Fig. 2G), mientras que las isogradas de metamorfismo Buchan se reconocen en el área de estudio como zonas de Bt y $Gt-St-And$. La zona de Bt aparece en filitas, pizarras y esquistos de los Dominios El Venado, Lomas Coloradas-Guindos y Quiñenco. Cuentan con asociaciones de $Ab+Mb1+Mb2+Chl+Bt+Kfs+Qz$ y ocurrencias de $\pm Sph\pm Ilm\pm Gr\pm Py\pm Zrn\pm Ap\pm Tur$. La zona de $St-And$ se encuentra en los sectores de Colcura-Chivilingo norte con metapsamopelitas de textura porfirolepidoblástica, asociaciones minerales de $Gt+St+Bt+Chl+Zo+Ep+And+Mb+Qz+Kfs$ y accesorios $\pm Mnz\pm Zrn\pm Ilm\pm Tur$. La distribución de la St se limita al Dominio Lota-Colcura hasta Chivilingo, mientras que al interior desaparece en contacto con la Unidad Patagual-El Venado (Fig. 1). Además, las And son de tipo quistolita en la costa y sólo vuelven a aparecer en el Dominio Palco-Mintrihue y Chiguayante como corneanas de $Bt-Chl$ con And pinitizada.

El evento D1 en la Serie Oriental presenta orientaciones S_{0-1} con tendencias NO-SE ; ONO-ESE y OSO-ENE. En el sector Guayo las metapsamopelitas de bajo grado poseen rumbos S_{0-1} ONO-ESE/70-80°SO y NE con ejes de pliegues $F1$ buzando 19° ESE (Fig.1). En Playa Laraquete y Chivilingo Sur, los flancos de pliegues volcados se interpretan como pliegue cilíndrico en etapas iniciales, con plano axial de orientación NO-SE/56°SO. Al interior de Laraquete se observa And pre a sin- S_1 con flancos de pliegue de rumbo NO-SE. Las secuencias S_{0-1} presentan porfiroblastos de Gt en metapsamitas y St pre-sin S_1 en metapelitas con rumbos NNO-SSE a N-S y ejes de pliegues recumbentes N-S.

El evento D2 se encuentra plegando secuencias de metapsamopelitas formando microlitones apretados como clivaje de plano axial S_2 . De norte a sur presenta variaciones: NE-SO y NNE-SSO, donde en Lomas Coloradas-Guindos las orientaciones S_2 de rumbo NE-SO/~25°NO y otras orientaciones NNE-SSO/30°E y ONO-ESE/55°NNE. La Serie Oriental cerca del contacto con la Serie Occidental posee orientaciones similares en Quiñenco con pliegues apretados inclinados, plano axial en dirección NE-SO/45-60°SE y ejes de pliegue $F2$ 68° al SE (Fig. 2F). En Lomas Coloradas y Quiñenco presentan porfiroblastos pre- S_2 de Bt . En el sector de Guayo es posible identificar una foliación S_2 penetrativa sobrepuesta al S_{0-1} de metapsamopelitas de bajo grado sin porfiroblastos con rumbos N35°E/62°SE y ejes de pliegues $F2$ buzando al NE (Fig. 2G). Hacia el SE, en el Dominio Patagual, estas mismas metapsamopelitas presentan foliaciones S_2 de rumbo NE-SO a ENE-OSO/~45°NO y SE (Fig.1). En Lota-Colcura el manteo disminuye a 10-20°SE con pliegues recumbentes $F2$ de rumbo NNE-SSO y NE-SO y ejes de pliegue buzando 15° SSO. Esta tendencia persiste en playa Chivilingo Norte con $F2$ inclinados y planos axiales que varían NNE-SSO/30°ESE y NE-SO/ 25°SE con ejes de pliegues parásitos e inclinados 20-40° buzando al NE. En este Dominio se observaron porfiroblastos de St sin- S_1 y pre S_2 en metapelitas envueltos por la matriz; Gt en metapsamitas pre y sin- S_1 . En Laraquete Chivilingo Sur las orientaciones S_2 cambian y poseen un clivaje de plano axial de pliegues inclinados vergentes al NO con rumbos NNE-SSO/55°SE y ejes de pliegue $F2$ buzando 10° al SSO (Fig. 1). La And post- S_2 y la St pre- S_2 no se encuentra presente en playa Laraquete, sin embargo en los caminos forestales de Laraquete es posible encontrar And de tipo quistolita de 5 pre y sin- S_1 .

El evento D3 en la Serie Oriental posee estructuras frágil-dúctiles vinculadas a pliegues por propagación de falla. En Quiñenco se registran fallas inversas de bajo ángulo en sentido NNO-SSE/30°E y fallas normales de alto ángulo en sentido ENE-OSO/60-70°SSE. Las secuencias de metapsamopelitas de bajo grado en El Bordo presentan un pliegue por propagación de falla NNE-SSO/~30° manteando al ESE. Estos pliegues por propagación de falla presentan una cinemática sinistral inversa en Colcura norte con orientaciones NE-SO/~60°NO cortando foliaciones S_2 en metapsamopelitas con $St-Gt-And$ (Fig.2I). Además, se observan desplazamientos a lo largo de S_2 como codos o *jogs* dilatacionales de Qz sinistral y tendencias S_2 de rumbo NE-SO en el área de Colcura. En playa Chivilingo Norte las rocas calcosilicatadas poseen asociaciones minerales de $Gt+Chl+Qz+Zo$ y $\pm Cal\pm Bt\pm Smc\pm Zrn\pm Ap$ con porfiroblastos de $Chl2$ afectadas por fábricas S-C y Gt pre- S_2 fracturados alineados de manera dextral con minerales de $Zo+Chl+Qz$ asociados a estos planos de cizalla (Fig.2H).

Finalmente, se registra un evento D4 en los Dominios Miramar con fallas inversas ~N-S/25-35° E y O y pliegues de orientaciones similar $F1$ N-S/subhorizontal en El Venado paralelas al lineamiento de Laguna Chica (Fig.1). Además, se observan grietas tensionales asociadas a una falla normal dextral en Patagual. En Mintrihue-Chiguayante se interpretan orientaciones ~N-S/70-80°E afectando rocas corneanas de $Chl+Bt+Qz+Feld-K+Mb1$ y $Mb2$ con alteraciones a sericitas y en ocasiones spots de And .

Discusión y Conclusión:

El objetivo del estudio fue evaluar los eventos de deformación ante la ocurrencia de metabasitas a 6 km al E del contacto propuesto [2]. Si bien la presencia de rocas oceánicas es comúnmente un criterio utilizado para identificar la Serie Occidental, existen reportes de que estos litotipos pueden ser incorporados en unidades similares a la Serie Oriental [11]. Sin embargo, nuestros resultados concuerdan con estudios previos en la Serie Occidental de foliaciones S_1 relictas en inclusiones grafito en Ab pre-sin- S_2 [2,4,9] y presencia de estiplonmelano asociado a la retrogradación de facies de esquistos verdes inferior-azules [9]. Además, la presencia de texturas de recristalización dinámica y cizalle simple nos indican una mayor tasa deformativa en los dominios asociados a la Serie Occidental [8].

En la Serie Occidental al sur se han reportado estructuras regionales con orientaciones ONO-ESE controlando la foliación S_2 [9] similares al lineamiento Escuadrón-Quíñenco. Interpretamos que el emplazamiento de la Serie Occidental en el Dominio Quiñenco-Coronel es facilitado por un movimiento de rumbo sinistral a lo largo de estas estructuras (Fig.1). Las orientaciones ONO-ESE y NE-SO corresponden a las orientaciones actuales de S_2 . Estas últimas poseen tendencias similares a estructuras frágil-dúctiles como cataclasitas y fábricas S-C que cortan S_2 en la Serie Occidental. Además, las L_3 de crenulación son paralelas a los rumbos S_2 observados en Yobilo y Maule, por lo que estos eventos podrían estar ocurriendo simultáneamente durante la exhumación.

Este evento D2/3 en la Serie Oriental se propaga con 2 tendencias: En primer lugar ortogonalmente a estructuras ONO-ESE se generan cabalgamientos de orientación NNE-SSO con vergencia al NNO. Estas estructuras pueden estar controlando el emplazamiento de la Unidad Patagual-El Venado [10] presentando un mayor volumen en latitudes donde aflora el Dominio Coronel-Quíñenco. En segundo lugar, las orientaciones NE-SO se registran como foliación S_2 sobreimpuesta en metapsamopelitas de bajo grado con rumbos ONO-ESE (Fig. 2G). Los resultados concuerdan con pliegues isoclinales recumbentes NE-SO y bandas tipo kink con tendencias NE obtenidas en Patagual [6]. Hacia el SE el evento D2/3 se propaga hasta el lineamiento Pileo-Colcura que actúa como *backstop*. Lo anterior genera una rotación en sentido horario localizada en los dominios Lota-Colcura y Quiñenco-Coronel con rumbos NE-SO, presencia de pliegues por propagación de falla (Fig.2I) y leves desplazamientos sinistral a lo largo de S_2 .

Al sur del lineamiento Pileo-Colcura los rumbos S_2 cambian a tendencias NNO-SSE y pliegues volcados NO-SE con F_2 vergentes al SO. Estudios previos interpretan estas orientaciones en el área como un evento D1 [2] que controla la distribución de la isograda de St en sentido NO-SE sin D1 [2] durante un metamorfismo barroviiano [8]. Sin embargo, esta disposición generaría un aumento del grado metamórfico hacia el NE, siendo dificultado por la ocurrencia de la Unidad Esquistos de Quiñenco y la zona de Bt. Otros estudios han descrito pliegues volcados NO-SE vergentes al SO producto de la transposición durante D2 [8], como también durante D3 producto de la rotación antihoraria de rumbos S_2 bajo un régimen transpresivo dextral en el Permo-Triásico [4,9]. Por otra parte, nuestros resultados en el Dominio Hualpén informan de una foliación S_3 sobreimpuestas a S_2 y fallas inversas NNO-SSE a NO-SE.

Si los rumbos NO-SE en Laraquete corresponde a un evento D3, una opción es que durante la transpresión oblicua dextral [4,9] la deformación se reacomoda a lo largo del lineamiento Pileo-Colcura dificultando su propagación en los Dominios Lota-Colcura y Coronel-Quíñenco. Esto podría explicar la presencia de fábricas S-C dextral en rocas calcosilicatadas (Fig. 2H). Si el evento D2/3 predomina en el dominio Lota-Colcura y Quiñenco-Coronel, la distribución localizada de isograda de St podría ser paralela a orientaciones NE-SO posterior a un metamorfismo tipo Buchan y/o barroviiano. Sugerimos complementar el presente estudio con nuevas determinaciones sobre las condiciones PT en la zona de And-St. Finalmente, durante el evento D4 la dirección de convergencia es en sentido E-O [4] lo que genera la presencia de estructuras frágil-dúctil N-S y E-O como grietas de tensión y pliegues armónicos verticales en ambas series.

Palabras Clave: metamorfismo, serie occidental, serie oriental, esquistos verdes, granate.

Financiamiento: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID, SERNAGEOMIN, Departamento Ciencias de la Tierra Universidad de Concepción.

Agradecimientos: SERNAGEOMIN, Instituto de Geología Económica y Aplicada, Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Concepción.

Referencias:

- [1] Glodny et al.2005. Internal dynamics of a paleoaccretionary wedge: insights from combined isotope tectonochronology and sandbox modelling of the South-Central Chilean forearc.
- [2] Hervé, 1977. Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, southcentral Chile.
- [3] Hervé et al. 2013. Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons.
- [4] Plissart et al. 2015. Accretionary prism mechanisms preserved in the Valdivia Coast basement (39°40'-39°53'S). XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena.
- [5] Whitney & Evans, 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. Am. Mineral.
- [6] Vásquez, 2001. Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de la Costa de Chile entre los 36° 30' y 38° 00' S. Universidad de Concepción.
- [7] Velásquez et al. (este congreso). Esquistos de Quiñenco, registro de la Serie Occidental en el segmento norte de la Cordillera de Nahuelbuta, región del Biobío. XVI Congreso Geológico Chileno, Santiago.
- [8] Palape, 2014. Deformación del Basamento Metamórfico Paleozoico en La Transecta Tanumé - Pichilemu, entre los 34,2° Y 34,5°S, Cordillera de la Costa de Chile Central. Universidad de Chile.
- [9] Martin et al.1999. Evolution of the late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south central Chile (38°-41°S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana.
- [10] Mardonez et al. 2012. Caracterización y condiciones de metamorfismo de una nueva unidad dentro del Paleozoico de la Cordillera de la Costa (Unidad Patagual-El Venado), Región del Biobío, Chile.
- [11] Richter et al. 2007. Structural contacts in subduction complexes and their tectonic significance: the Late Palaeozoic coastal accretionary wedge of central Chile.

Fluidos en la formación del Complejo Bahía Mansa de la Serie Occidental del basamento metamórfico paleozoico de Chile central-sur

Carolina Morales Rizzo¹, Daniel Moncada², Francisco Hervé¹⁻²

(1) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Sazie 2119, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El complejo metamórfico Bahía Mansa (CMBM) está ubicado entre los 39 y 42°S en la Cordillera de la Costa de la Región de los Lagos, Chile. Presenta edades del Devónico al Pérmico, siendo parte de la Serie Occidental del basamento metamórfico de los Andes centrales sur cuya génesis está asociado a un sistema de prisma de acreción basal Carbonífero Tardío a Triásico (González, 1970; Aguirre et al., 1972; Hervé, 1988; Martín et al., 1999; Duhart et al., 2001). Este se compone principalmente de esquistos pelíticos a semipelíticos, en menos proporción metaareniscas, esquistos máficos, rocas máficas y más escasos metacherts y milonitas, además de metaigmimbritas ubicadas localmente intercaladas con esquistos pelíticos y escasos cuerpos intrusivos (Söllner et al., 2000). Las texturas de minerales metamórficos indican que este complejo fue expuesto a una deformación y metamorfismo de manera dúctil y penetrativa que provocó una foliación característica en las rocas que ha obliterado una foliación previa más antigua (Díaz et al., 1988). La primera de estas dos fases de deformación y metamorfismo D1 fue generada a altas presiones y temperaturas, en la facie de esquistos azules y la posterior D2 fue expuesta a una deformación de altas presiones y bajas temperaturas en la facie de esquistos verdes con edades del Carbonífero y del Permo-Triásico respectivamente (Duhart et al., 2001). Asimismo, varios estudios termobarométricos realizados en el CMBM indican que el metamorfismo D1 podría haber alcanzado la facie de eclogita-anfibolita/esquistos azules para luego retrogradar a la facie de esquistos verdes (Willner et al., 2001; Willner et al., 2004; Kato et al., 2008).

Según Yardley (1986) e Ingebritsen & Manning (2010), los complejos metamórficos de un cinturón orogénico evolucionan a partir de sedimentos porosos, los cuales poseen un elevado contenido de agua haciéndolos sobresaturados. Por otro lado, en rocas cristalinas, esta porosidad disminuye, sin embargo, se puede encontrar niveles significativos de fluidos ya sea por fracturas o reacciones metamórficas que generan una segunda porosidad, generando que las rocas metamórficas actúen como conductos o canales y liberen fluidos en determinadas fases de su evolución metamórfica, sobre todo cuando estos fluidos son calentados (Yardley, 1997). Más aún, durante la deformación progradante, el fluido de la roca es calentado por las altas presiones y la impermeabilidad de la roca, donde este fluido evoluciona progresivamente a medida que es liberado, provocando una disminución de la temperatura alcanzada dando paso a una retrogresión en la deformación (Yardley & Claverley, 2015). Ello da como resultado una roca deshidratada o "seca" con potenciales conductos que actúan como canales, los que ayudan a rehidratar la roca a las nuevas condiciones del metamorfismo, generando pequeñas inclusiones fluidas (Yardley & Claverley, 2015).

Las inclusiones fluidas en base a su composición química son tratadas como mezclas de distintos elementos y son comunes en variados ambientes geológicos, sobre todo en rocas metamórficas de grado alto a medio (Roedder, 1984). Por otra parte, debido a la progresiva deshidratación de las rocas sometidas a metamorfismo, estas deberían contener inclusiones fluidas de baja salinidad, pero Yardley & Graham (2002) han demostrado que estos fluidos suelen ser bastantes salinos. Sin embargo, cuando la procedencia de estos sedimentos es oceánica o acrecional, los valores de salinidad no son extremos y se dan en muy poca proporción (Yardley & Claverley, 2015). La composición del fluido metamórfico dependerá tanto del entorno metamórfico como de la naturaleza y las cantidades de fluidos presentes en el metamorfismo. Por lo que en el CMBM se espera encontrar fluidos circundantes que participaron de la deformación que tuvo este complejo. Los fluidos metamórficos no tienen una clara distinción de acorde a su proveniencia y su diagénesis, si no que evolucionan continuamente por la interacción con la roca.

En esta investigación proponemos estudiar fluidos que fueron atrapados en las rocas donde se encuentran pequeñas inclusiones fluidas ricas en CO₂ y otros volátiles. Asimismo, con ayuda de las ecuaciones de estado EOS que correlacionan las propiedades termodinámicas dentro de los estados gaseoso y líquido, se analizará la evolución de los fluidos, lo que nos dará las presiones y temperaturas de solubilidad del fluido, junto a la profundidad y nivel que tuvo este metamorfismo progresivo hasta llegar a la superficie. Las inclusiones fluidas proporcionan el único medio directo de examinar el fluido presente en antiguos entornos, almacenan información de sus condiciones fisicoquímicas (Goldstein & Reynolds, 1994) en las que se deformó este complejo metamórfico.

Palabras Clave: Inclusiones fluidas, H₂O+CO₂±NaCl, Petrografía, margen suroccidental.

Financiamiento: FONDEQUIP EQM170103 y Proyecto FONDECYT 11170210.

Referencias:

- Aguirre, L., Herve, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile. *anoutline krystalinikum*, 9, 7-1.
- Duhart, P., McDonough, M., Muñoz, J., & Villeneuve, M. (2001). El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30' -42°00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista Geológica de Chile*, págs. 179-208.
- González Bonorino, F. (1970). Series metamórficas del basamento cristalino de la cordillera de la Costa, Chile Central. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Comunicaciones.
- Herve, F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in southern Chile. *Episodes* 11, 183-188.
- Ingebritsen, S., & Manning, C. (2010). Permeability of the continental crust: dynamic variations inferred from seismicity and metamorphism. *Geofluids*, 193-205.
- Martin, M., Kato, T., Rodríguez, C., Godoy, E., Duhart, P., McDonough, M., & Campos, A. (1999). Evolution of late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south-central Chile (38°-41°S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*, 18(4), 582-605.
- Willner, A., Pawling, S., Massone, H., & Herve, F. (2001). Metamorphic evolution of spessartine quartzites (coticules) in the high pressure/low temperature complex at Bahía Mansa, Coastal Cordillera of south-central Chile. *The Canadian Mineralogist*, 39(6), 1547-1569.
- Yardley, B. (1986). Fluid migration and veining in the Connemara Schists, Ireland. In *Fluid-rock interactions during metamorphism*, (págs. 109-131). Springer New York.
- Yardley, B., & Claverley, J. (2015). The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits. London: The Geological Society of London.
- Yardley, B., & Graham, J. (2002). The origins of salinity in metamorphic fluids. *Geofluids*, 2(4), 249-256.

Origin and tectono-metamorphic evolution of Mn-rich rocks preserved in the Bahía Mansa Metamorphic Complex (Los Ríos, Chile)

Gaëlle Plissart¹, Bruno Escares²

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Valdivia, Chile

The metamorphic basement of the Chilean Coastal Cordillera (32°–42°S) represents a paleo-accretionary prism active during Late Paleozoic-Triassic times [Hervé 1988]. It is classically divided into the Western Series, recording a high-P, basal underplating accretion, and the Eastern Series, a low-grade unit overprinted by Carboniferous contact metamorphism [Willner 2005]. The Western Series are characterized by slices of oceanic crust and mantle units distributed within the metasedimentary sequence [Duhart et al. 2001]. These rocks share greenschist-blueschist transitional facies conditions (7.0–9.3 kbar and 380–420°C) [Willner 2005]. Additionally, local higher-P rocks (blueschists and amphibolites-eclogites transitional facies) were recognized in several localities [e.g. Kato et al. 2008; Hyppolito et al. 2014; Plissart et al. 2019]. The Western Series also host Fe-Mn-rich rocks such as BIFs, massive sulfides, Fe- and Mn-rich metacherts and zussmanite-bearing rocks (e.g. Massonne et al. 1998; Willner et al. 2001; Muñoz 2007).

In this study, we present new results on peculiar Mn-rich rocks discovered in the Valdivian coast (Playa Rosada). We performed structural mapping, detailed petrographic microscope and SEM observations to unravel the paragenetic sequences preserved in the rocks, as well as electron microprobe analyses and bulk rock geochemistry.

Structures are dominated by foliations (S_2 : N126/20SW, $n = 89$) and stretching lineations (L_2 : N293/02, $n = 61$), together with recumbent isoclinal folds and sheath-like folds. Two main Mn-rich lithologies were observed. The first is interlayered with micaschists and consists in pink piemontite-bearing quartz-micaschists. The second ones are white-pink-orange decametric to centimetric Mn-boudins enclosed in greyish micaschists, with a vergence to the NW. The piemontite-bearing micaschists display a paragenetic assemblage of Qtz + white mica + Pie + Ab + Mn-Grt, forming a granolepidoblastic texture. The Mn-boudin are composed of distinct granular massive zones, from core to rim: (i) a core made of tephroite + rhodonite/pyroxmangite + rhodochrosite; (ii) a second paragenesis made of amphibole + Mn-garnet + a second generation of rhodochrosite pseudomorphosing pyroxenoids; (iii) a third paragenesis made of CaMn-carbonate + amphibole + Mn-garnet + quartz; and (iv) a rim made of Mn-garnet + rhodochrosite + Ca-carbonate + amphibole + quartz. Gersdorffite, cobaltite, (FeNi) and (CoFeNi) sulphides, and pyrophanite are observed in the core. The Mn-garnets are highly anisotropic, without zonation and consists in spessartine ($XMn=0.85$, $XCa=0.11$, $XFe=0.03$, $XMg=0.01$). The amphiboles are rich in Mn and consist in clinosuenoite. Bulk rock analyses were undertaken in the piemontite-bearing schist, the core, zone (ii) and zone (iii) of the Mn-boudin, and the enclosing schist. They show MnO wt% contents of 2.08, 43.2, 35.1, 28.0 and 0.47, respectively. The 3 zones of the boudin are characterized by low total REE contents respect to the 2 schists and display a depleted LREE pattern and positive Y anomaly when normalized to PAAS.

Our geochemical results indicate that the protolith of the Mn-boudin formed in a hydrothermal environment [Josso et al. 2016]. As they also present Co, Ni and Fe sulphides, they are probably genetically associated with a volcanic massive sulphide deposit. Indeed, Mn-sediments can precipitate from hydrothermal fluids vented in chimneys or from "hydrothermal plumes" containing colloidal silica and Fe-Mn-oxyhydroxides that would disperse and deposit farther [Grenne and Slack 2003]. These deposits were further metamorphosed during their subduction. The peak was likely preserved in the core, where the presence of pyroxmangite could indicate high-pressure conditions, possibly similar to blueschist facies if compared with the famous Mn-minerals of Praborna (Italy) [Tumiati 2005]. The various zones inside the boudin could reflect retrogression and chemical exchange with enclosing schists. The presence of anisotropic tetragonal garnet in these zones indicates low temperature conditions (<450°C) and such garnets are also typically encountered in blueschist facies rocks [Cesare et al. 2019]. As for the chemical exchange, the increase of Al, Ca and CO₂ and decrease of Mn towards the rim, would indicate that CO₂-rich fluids percolated in the rock and that Mn was removed, further transported in other lithologies, as for example, the piemontite-bearing mica schist. Raman analyses and geothermobarometry are underway and will permit better discrimination of polymorphs (calcite/aragonite; rhodonite/pyroxmangite) and understand the metamorphic evolution of these unusual rocks.

Palabras Clave: subduction metamorphism, oceanic hydrothermal deposit, tephroite-pyroxmangite-rhodonite-rhodochrosite-clinosuenoite-spessartine-pyrophanite.

Financiamiento: Fondecyt Iniciación 11150635.

Referencias:

- Cesare, B. et al. (2019). Garnet, the archetypal cubic mineral, grows tetragonal. *Sci. Rep.* 9(1): 1-13.
- Duhart P., et al. (2001). El complejo metamórfico Bahía Mansa en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'–42°00'S). *Rev. Geol. de Chile* 28:179–208.
- Grenne T. and Slack J.F. (2003). Paleozoic and Mesozoic silica-rich seawater: Evidence from hematitic chert (jasper) deposits. *Geology* 31: 319–322.
- Hervé F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile, Episodes 11: 183–188.
- Hyppolito T., et al. (2014). Late Paleozoic onset of subduction and exhumation at the western margin of Gondwana (Chilenia Terrane). *Lithos* 206–207: 409–434.
- Josso, P., et al. (2017). A new discrimination scheme for oceanic ferromanganese deposits using high field strength and rare earth elements. *Org. Geol. Rev.* 87: 3-15.
- Kato T.T., et al. (2008). Inception of a Devonian subduction zone along the southwestern Gondwana margin. *Can. J. of Earth Sci.* 45: 337–351.
- Massonne H.-J., et al. (1998). Zussmanite in ferruginous metasediments from Southern Central Chile. *Min. Mag.* 62(6): 869-876. Muñoz V. (2007). El basamento metamórfico paleozoico, Serie Occidental en la Hoja Queule, IX y X Región, Chile. Condiciones presión – temperatura del metamorfismo. Tesis Univ. de Chile, 191 p.
- Plissart G., et al. (2019). Tectono-metamorphic evolution of subduction channel serpentinites from South-Central Chile. *Lithos* 336-337: 221-241.
- Tumiati, S. (2005). Geochemistry, mineralogy, and petrology of the eclogitized manganese deposit of Praborna (Valle d'Aosta, Western Italian Alps). PhD thesis, Univ. Paris 7, 240 p.
- Willner A.P. (2005). Pressure-temperature evolution of an Upper Paleozoic paired metamorphic belt in Central Chile (34°–35°30' S). *J. of Petr.* 46: 1805–1833.
- Willner A. P., et al. (2001). Metamorphic evolution of spessartine quartzites (cotecules) in the high pressure/low temperature complex at Bahía Mansa (Coastal Cordillera of Southern Central Chile). *Can. Min.* 39: 1547–1569.

Petrografía y estructura del Complejo Metamórfico Limón Verde, Cordillera Domeyko, Norte Grande de Chile

Gabriela Ramírez Tapia¹, Camilo Palape Reyes²⁻³, Sergio Calderón Díaz⁴

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Viña del Mar, Chile

(2) Universidad de Oviedo, Departamento de Geología, Área de geodinámica interna, Oviedo, España

(3) Universidad Central de Chile, Carrera de Geología, Ingeniería y Arquitectura, Lord Cochrane 418, Santiago, Chile

(4) Independiente, Valparaíso, Chile

Las rocas del Complejo Metamórfico Limón Verde (CMLV), ubicadas 10 km al suroeste de Calama, forman parte del basamento antiguo del Norte Grande de Chile, el cual tiene una historia evolutiva compleja desarrollada durante el Paleozoico. Se presentan nuevos antecedentes petrográficos y estructurales del CMLV los cuales permiten construir un nuevo modelo evolutivo, en el contexto de amalgamación de terrenos al margen occidental del Gondwana. A partir de un mapeo a escala 1:5000 y análisis petrográficos de rocas del CMLV del flanco noroeste de la Sierra Limón Verde, se establecieron relaciones de deformación y cristalización de fases minerales asociadas a microestructuras, a partir de lo cual se interpreta la vergencia de la estructura a escala regional que afecta al complejo metamórfico.

Las rocas que componen el CMLV corresponden a filitas, esquistos verdes, esquistos micáceos, esquistos cuarzo micáceos y anfíbolitas, los tres últimos con y sin granates. Estas rocas son clasificadas bajo dos criterios litológicos: según su litología dominante en zonas de esquistos, de anfíbolitas y de filitas, y según zonas de mezcla litológica en zonas mixtas I y II.

En términos de deformación, las rocas del CMLV registran 4 episodios de deformación: Las estructuras D1, no se reconocen en el área, sin embargo, se observa una foliación penetrativa S_1 con desarrollo de texturas nematoblásticas y lepidoblásticas en este plano de foliación. Las estructuras D2, son observadas en mesoestructuras que pliegan a la foliación anterior S_1 , cuyos planos axiales desarrollan una foliación principal S_2 con manteo hacia el SSW, localizada principalmente en la zona de charnela de pliegues en vaina mayores, con lineación de estiramiento inclinada al NE con 20° y con ejes de pliegues curvos subhorizontales de rumbo NNW-SSE. Las estructuras del evento deformativo D3 se reconoce en el clivaje de crenulación S_3 asociado al plano axial de un antiforme de eje NE/SW que pliega a la foliación anterior S_2 . El plano axial S_3 mantea hacia el SW y la vergencia del antiforme es hacia el NE, probablemente relacionado al clímax deformacional del Paleozoico tardío. Finalmente, D4 corresponde a un evento de deformación frágil provocado por efecto del sistema de falla Domeyko en el lugar, el cual pliega a la foliación S_2 hacia el WNW como un sinclinal de bloque yacente asociado a la Falla Limón Verde de tipo inversa vergente al WNW.

Particularmente, durante el evento D2, se observaron en porfiroblastos de granate, sombras de presión conformadas por cuarzo, micas blancas y biotitas que sumado a estructuras sigmoidales S-C-C' indican cinemática del bloque superior hacia el NE para esas estructuras. Esto se interpreta como un pliegue en vaina regional elongado en dirección NE/SW, con vergencia al NE asociado a una zona de cizalle milonítica de falla inversa que según su petrografía presenta un aumento del grado metamórfico y la deformación desde el NW hacia el SE.

Los datos petrográficos son consistentes con el desarrollo de un prisma de acreción que alcanzó condiciones de alta presión con un peak de 650°C y entre 11 a 14 kbar de presión (Soto 2013). Al correlacionar estos datos con trayectorias PT de la zona de estudio obtenidas por Soto (2013), se establece que las edades determinadas para el CMLV corresponden a un último evento metamórfico de alta temperatura que podría estar asociado a la intrusión del Complejo Ígneo Limón Verde de edad pérmica (Hervé et al., 2014). La deformación principal (D2) de este complejo estaría asociada a la colisión de la sub-placa de Atacama contra el margen occidental de Gondwana durante el Silúrico (Heredia et al., 2018), como una fase final del cierre de la cuenca de trasarco que se habría formado por la separación de la misma sub-placa de Atacama desde Gondwana durante el Ordovícico (Heredia et al., 2018).

Palabras Clave: Complejo metamórfico, Pliegue en vaina, granates, limón verde, paleozoico.

Financiamiento: Financiamiento de terreno y trabajo de gabinete: autofinanciado. Financiamiento de cortes transparentes: Universidad Andrés Bello, sedes Viña del Mar y Santiago.

Agradecimientos: A Camilo Palape y Sergio Calderón, por enseñar sus conocimientos, por su sabiduría, por su motivación y paciencia. A mi familia, por siempre estar.

Referencias:

- Heredia, N, García-Sansegundo J et al, 2018. The Pre-Andean Phases of Construction of the Southern Andes Basement in Neoproterozoic–Paleozoic Times. In: The Evolution of the Chilean-Argentinian Andes. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham.
- Hervé, F., Fanning, C. M., Calderón, M., & Mpodozis, C. (2014). Early Permian to Late Triassic batholiths of the Chilean Frontal Cordillera (28° – 31° S): SHRIMP U-Pb zircon ages and Lu-Hf and O isotope systematics. *Lithos*, 184–187, 436–446.
- Ramírez, G., 2022. Estructura del complejo metamórfico Limón Verde, cordillera Domeyko, Norte Grande de Chile. p. 20–45.
- Soto, M. F., 2013. Pressure-Temperature-Time paths of the Limón Verde Metamorphic Complex, Chile. Santiago, Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Registro cinemático y evolución metamórfica de rocas formadas en las facies esquistos azules y esquistos verdes en el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (Región de los Lagos, Chile)

Aníbal Rivera Herrera¹, Gaëlle Plissart², Carolina Pavez¹

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

El basamento metamórfico en el Centro-Sur de Chile corresponde a un paleo-prisma de acreción formado durante el Paleozoico tardío en el antiguo borde convergente de Gondwana. Entre los 39°-42°S, Duhart et al. (2001) define el basamento como el Complejo Metamórfico Bahía-Mansa (CMBM) que forma parte de la Serie Occidental, la cual se formó debido a procesos de acreción basal. Recientemente, en el marco del proyecto Fondecyt Iniciación 11150635, se han reportado afloramientos de esquistos azules en contacto con rocas de facies esquistos verdes en San Carlos-Manquemapu. Estos nuevos hallazgos son claves para comprender la evolución geodinámica del basamento metamórfico tardi-paleozoico.

En la zona de estudio, se tiene registro de 3 eventos de deformación principales: D1, D2 y D3. Pavez (2019) subdivide el evento D1 en 2: D1a que ocurre en zonas someras dentro del canal de subducción, preservado mayoritariamente en esquistos pelíticos y D1b que ocurre en zonas más profundas del canal, en condiciones de facies esquistos azules. Por otro lado, D2 corresponde a la acreción basal y D3 a un acortamiento subhorizontal dentro del prisma. En este trabajo, el estudio se enfoca en el evento D1b. Se realizó un estudio macro- y micro-estructural con el fin de distinguir eventos de deformación, determinar la vergencia de estructuras asimétricas (W o E) e identificar en cual paragénesis se encuentran registradas (facies esquistos azules, verdes o transicionales). Sumado a esto, se utilizaron datos de microsonda para obtener química mineral en anfíbol, además se realizaron 3 mapas químicos de minerales con el fin de caracterizar las paragénesis. Finalmente, se realizó datación Ar-Ar *in situ* en fengitas.

Dentro de las litologías, destacan esquistos máficos azules, verdes y azules verdosos. Los esquistos azules están compuestos de glaucofano + albita + epidota + fengita + titanita ± granate ± rutilo ± óxidos de Fe. Por otro lado, los esquistos verdes presentan clorita + actinolita + albita + epidota + titanita. En cuanto a los esquistos azules verdosos, se observa un reemplazo pseudomórfico parcial de fases de la facies esquistos azules por fases de la facies esquistos verdes, también evidenciado por la química mineral (cristales de anfíbol empobrecidos en Na y enriquecidos en Ca hacia los bordes). Respecto a las estructuras, se reconocieron boudines métricos a decimétricos, bandas de cizalle y sombras de presión a escalas macro y microscópica, blastos en forma de pez y foliación oblicua en cuarzo. Las estructuras macroscópicas casi siempre registran vergencia hacia el E (exhumación). Al contrario, estructuras microscópicas registradas en esquistos azules frescos indican movimiento de enterramiento (vergencia hacia el W), demostrando que la deformación asociada a la exhumación se localizó solamente en bordes de los boudines, preservando el registro cinemático anterior. En cuanto a los esquistos azules verdosos, también registran una mayoría de vergencia al W asociada a la facies esquistos azules, pero estas estructuras se ven sobreimpuestas de manera estática por minerales de la facies esquistos verdes. Por ende, en los esquistos verdes, las microestructuras indican registro tanto al W como al E, por lo que se asocia la exhumación a un evento retrógrado. Los resultados Ar-Ar *in situ* en fengita de esquistos azules indican rangos de edades de 340-320 Ma para granos pre-D1b, 310-300 Ma para granos formados durante D1b en condiciones de facies esquistos azules con vergencia de enterramiento y 280-270 Ma para recristalización de granos en condiciones retrógradas y de exhumación.

Nuestros resultados sugieren que el flujo de retorno dentro del canal de subducción es el responsable de generar la juxtaposición tectónica entre esquistos azules, azules verdosos y verdes. La sobreimpresión (parcial o total) de minerales de la facies esquistos verdes también ocurriría dentro del canal, una vez los esquistos azules ascienden a través de este. La evolución geodinámica del CMBM en este trabajo se considera desde la formación de los esquistos azules a los 340-320 Ma y su incorporación en zonas profundas del canal a los 310-300 Ma coetáneo al evento D1b con vergencia al W. Poco antes de los 280 Ma, los esquistos azules ascienden por el canal siendo afectados por un evento retrógrado en facies esquistos verdes, registrando así el evento D1b y vergencia al E en esas condiciones P-T. Entre los 280-270 Ma, tuvo lugar la exhumación en el canal y luego, el evento D1//D2, marcando el inicio de la acreción de esquistos máficos y pelíticos en la base del prisma, aún con estiramiento importante. Por último, a los 260-220 Ma ocurrió D2, en condiciones de facies esquistos verdes propiamente tal, asociado a la acreción basal y aplastamiento en la base del prisma.

Palabras Clave: Prisma de acreción, Canal de subducción, Esquisto azul, Esquisto verde, Manquemapu-San Carlos.

Financiamiento: Investigación financiada por Fondecyt Iniciación 11150635 a cargo de Gaëlle Plissart.

Referencias:

- Duhart, P.; McDonough, M.; Muñoz, J.; Martin, M.; Villeneuve, M. 2001. El complejo metamórfico Bahía Mansa en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'– 42° 00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista geológica de Chile* 28(2): 179-208
- Pavez, C. 2019. Estudio petrográfico y estructural del Complejo Metamórfico de Bahía Mansa en el sector de Manquemapu, Región de los Lagos, Chile. Tesis para optar al título de geólogo. Universidad Austral de Chile.

Petrografía y rasgos estructurales del basamento metamórfico de la Cordillera de Piuchén (42°02'S - 42°40'S), Isla de Chiloé

Felipe Rivera Mansilla¹, Mauricio Calderón Nettle¹, Mario Aguilera Pozo¹, Cristóbal Cáceres Díaz¹, Benjamín Pérez Ferrer¹

(1) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Av. La Plaza 680, Santiago, Chile

Las asociaciones de rocas metamórficas que afloran en la Cordillera de Piuchén, ubicada en el sector occidental de la Isla de Chiloé, comprenden esquistos cuarzo-micáceos, esquistos de clorita, cuarcitas y filitas. Similares tipos litológicos han sido descritos en el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) y en el Complejo Metamórfico de los Chonos (CMCh), que albergan rocas que se formaron en la zona profunda del prisma de acreción en un régimen de condiciones metamórficas de alta presión y baja temperatura (alta razón P/T). Con el propósito de establecer el ambiente geodinámico en que se formaron las rocas de la Cordillera de Piuchén se llevó a cabo una campaña de terreno en la que se obtuvieron muestras y datos estructurales cuyo análisis preliminar permite establecer semejanzas de este macizo con otras unidades metamórficas regionales. En este estudio se reportan datos de tres localidades de la provincia de Chiloé reconociendo diferentes litologías dentro de cada zona. En orden de norte a sur se presentan *Chepu*, donde se describen filitas deformadas en contacto con esquistos verdes en el sector norte del río homónimo, siendo visibles pequeños sigmoides elongados en la dirección norte-sur indicativos de una cinemática dextral. En el sector sur se presentan esquistos cuarzo-micáceos con estructuras penetrativas definidas por un clivaje de crenulación; éstas se encuentran en contacto con filitas. A rasgos generales la foliación principal (S_1) de orientación general norte-sur está afectada por un clivaje de crenulación (S_2). En *Abtao*, predominan los esquistos cuarzo-micáceos con intercalaciones de filitas, encontrándose de forma más acotada intercalaciones de esquistos de clorita. Las rocas presentan un marcado clivaje de crenulación (S_2) y vetas de cuarzo afectadas por procesos de disolución por presión. En *Cucao*, se tiene presencia predominante de esquistos de clorita, que presentan microplegamiento de la foliación principal (S_1) y venas de carbonato con epidota y cantidades subordinadas de cuarzo. El estudio petrográfico de las muestras recolectadas y de la colección de la Tesis de Hufmann (2003) revelan las siguientes asociaciones mineralógicas: i) filitas de protolito pelítico presentan asociaciones minerales de mica blanca, clorita, cuarzo, plagioclasa y epidota con titanita, turmalina y grafito en cantidades accesorias; ii) esquistos cuarzo-micáceos asociados a un protolito psamo-pelítico, presentan asociaciones minerales de cuarzo, mica blanca, clorita, epidota con granate ocasional asemejándose a las asociaciones de minerales presentes en las filitas; iii) los esquistos de clorita asociados a un protolito máfico presentan asociaciones minerales de clorita, epidota, actinolita, cuarzo, plagioclasa y calcita con titanita y turmalina como minerales accesorios. En base a los resultados de química mineral y cálculos termobarométricos informados por Hufmann (2003), quien ha determinado que la mica blanca corresponde a fengita, y a la similitud mineral de aquellas muestras con las que se obtuvieron en este estudio, se presume que estas también se habrían formado en condiciones de facies de esquistos verdes y azules de baja temperatura. Basándose en datos preliminares de circones detríticos (Hervé, com. personal) la edad máxima de sedimentación del protolito de las rocas metamórficas en el mismo bloque de basamento es cercana al límite Pérmico – Triásico. Lo anterior, permite considerar que las rocas de la Cordillera de Piuchén registran un evento metamórfico de posible edad Triásica Media a Superior que ha sido reconocido en una de las unidades de rocas metamórficas del CMBM (Duhart et al., 2001).

Palabras Clave: Cordillera de Piuchén, metamorfismo de alta P/T, Provincia de Chiloé.

Financiamiento: Proyecto exploración 13220141 (ANID).

Referencias:

- Duhart, P., McDonough, M., Muñoz, J., Martin, M., & Villeneuve, M. (2001). El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'-42°00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista geológica de Chile*, 28(2), 179-208.
- Hufmann, L. (2003). Thermobarometrische und geochemische Untersuchungen der Gesteine der Küstenkordillere Chiloés, Südschile.

Condiciones P-T y edad del Complejo Metamórfico Caleta Loa, Cordillera de la Costa, norte de Chile (22° S)

Fernando Sepúlveda Vásquez¹, Paulina Vásquez Illanes¹, Andrea Hemmelmann², Gerhard Franz²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Regional, Avda. Sta. María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Technische Universität Berlin, Fachgebiet Mineralogie-Petrologie, Ackerstrasse 76, 13355, Berlín, Alemania

Las rocas del Complejo Metamórfico Caleta Loa (CMCL, Vásquez *et al.*, 2018) fueron descritas inicialmente por Lucassen *et al.* (1994) en el cañón del río Loa, cerca de su desembocadura. Allí identificaron migmatitas estromáticas con escasas intercalaciones de gneises equigranulares, capas pegmatíticas y ortogneises dioríticos (anfíbolitas). Vásquez *et al.* (2018) indicaron que este complejo se distribuye tanto en el cañón del río Loa, desde cerca de su desembocadura hasta la Falla de Atacama hacia el oeste, como en lomas aledañas al cañón, en el sector occidental de la cordillera de la Costa, y que está cubierto por rocas volcánicas del Triásico Superior-Jurásico Inferior. Estos autores también observaron que el CMCL está compuesto por migmatitas diatexiticas y metatexiticas estromáticas, donde las primeras predominan al norte del cañón del río Loa y las últimas en el cañón mismo y al sur de este.

El melanoma del CMCL se presenta en bloques de orientación N-S, constituidos por esquistos lepidó-granoblásticos, muy deformados. Las bandas lepidoblásticas están formadas por biotita, mica blanca, ilmenita, sillimanita, feldespato potásico, albita, con escasa cordierita, rutilo, circón y monacita. Las bandas granoblásticas poseen cuarzo, feldespato potásico, albita, apatito y, en menor medida, biotita y muscovita. El neosoma de las migmatitas diatexiticas corresponde a granitos con escasa biotita y muscovita, los que localmente gradan a gneises equigranulares. Las migmatitas estromáticas están compuestas por bandas claras con cuarzo, feldespato potásico y, en menor cantidad, por plagioclasa con muscovita y biotita, además de ilmenita, apatito y escasa cordierita. En las bandas oscuras se distinguen agregados de biotita, intercrecimiento de biotita, mica blanca e ilmenita y escasa sillimanita. Porfiroblastos de feldespato pre- o sin-tectónicos, con sombras de presión, indican movimiento sinistral hacia el oeste, y pliegues inclinados y asimétricos evidencian transporte tectónico en el mismo sentido.

Hemmelmann (2018) estudió la química mineral de fases metamórficas en migmatitas del complejo, y a partir del geotermómetro granate-biotita, obtuvo temperaturas entre 602°C y 864°C para su formación, similares a las reportadas por Lucassen *et al.* (1996). Para restringir las condiciones P-T del CMCL, en este estudio se construyeron pseudosecciones P-T con el software PERPLE_X (Connolly, 2005) utilizando la química de roca total de dos muestras de migmatitas. Los cálculos fueron llevados a cabo en el sistema MnNCKFMASH usando la base de datos termodinámicos de Holland y Powell (1998). Las condiciones de presión fueron derivadas al proyectar las isoplethas de Si de muscovita en el campo de estabilidad de este mineral en las pseudosecciones, e integrar esta información con las temperaturas obtenidas por Hemmelmann (2018). En una de las muestras estudiadas se determinaron presiones de ca. 7 kbar, mientras que otra indica presiones cercanas a 2,0-2,5 kbar. Sin embargo, en esta última muestra coexisten cristales de rutilo e ilmenita, lo que indicaría presiones de ca. 7-8 kbar (Angiboust y Harlov, 2017), por lo que se infiere que la muscovita de esta se habría formado durante una etapa retrógrada del metamorfismo, mientras que el *peak* metamórfico del CMCL estaría asociado a presiones de ca. 7 kbar.

El neosoma de las migmatitas del CMCL cuenta con edades U-Pb en circón de 316-318 Ma (Pankhurst *et al.*, 2016; Vásquez *et al.*, 2018), la que se interpreta como la edad del metamorfismo. Además, los patrones de edades de circones de las muestras analizadas por Pankhurst *et al.* (2016) muestran *peaks* significativos a los 350 Ma y 450-470 Ma. En este trabajo se determinó una edad de U-Pb en circones detríticos del melanoma del CMCL, cuyo *peak* más joven en el patrón de edades es de ca. 450 Ma, el que se interpreta como una edad máxima de sedimentación del protolito de estas rocas metamórficas. El patrón también presenta dos *peaks* más antiguos, a los 1.050 Ma y 1.350 Ma, los que coinciden con la edad del protolito del Complejo Metamórfico Sierra de Moreno (*sensu* Aguilé *et al.*, 2019), ubicado en la Precordillera, a la misma latitud. Sin considerar las edades de 316-318 Ma que representan la edad de la migmatización del CLMC, los patrones de edades U-Pb de circones de este complejo son similares a los reportados en la Formación El Toco, unidad donde diversos autores han obtenido patrones de edades de circones detríticos con *peaks* significativos de 350 Ma y 450-470 Ma (ver Creixell *et al.*, 2021). Estos antecedentes, junto con la cercanía de los afloramientos de ambas unidades, sugieren que el CMCL podría corresponder a la migmatización de la Fm. El Toco a mayores profundidades.

Palabras Clave: migmatitas, PERPLE_X, SW-Gondwana, N-Chile.

Financiamiento: Este trabajo es parte del Plan Nacional de Geología (PNG) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Agradecimientos: A Javier Álvarez y Marcos Suárez (SERNAGEOMIN); a Hans Massonne (Universität Stuttgart), Friedrich Lucassen.

Referencias:

- Aguilé, et al. 2019. Geología del área Quehuira-Chela, regiones de Tarapacá y Antofagasta. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 207: 293 p.
- Angiboust, S.; Harlov, D. 2017. Ilmenite breakdown and rutile-titanite stability in metagranitoids: Natural observations and experimental results. *Amer. Miner.* 102, 1696-1708.
- Connolly, J.A.D., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, 524-541.
- Creixell, C.; Sepúlveda, F.; Álvarez, J.; Vásquez, P.; Velásquez, R. 2021. The Carboniferous onset of subduction at SW Gondwana revisited: Sedimentation and deformation processes along the late Paleozoic forearc of north Chile (21°-33° S). *J. South Amer. Earth Sci.* 107, 103149.
- Hemmelmann, A. 2018. Petrologie und Mineralchemie des metamorphen andinen Basements bei Caleta Loa, Nordchile. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin: 56 p.
- Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorph. Geol.* 16, 309-343.
- Lucassen, F.; Laber, A.; Franz, G. 1994. Geology and petrology of metamorphic rocks from the Preandean basement of northern Chile, 18°-24° S. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 7, Actas I: 96-100.
- Lucassen, F.; Wilke, H.-G.; Viramonte, J.; Becchio, R.; Franz, G.; Laber, A.; Wernmer, K.; Vroon, P. 1996. The paleozoic basement of the central andes (18°-26°S) a metamorphic view. In *International Symposium on Andean Geodynamics*, No. 3, Abstract: 779-782.
- St. Malo, France. Pankhurst, R.; Hervé, F.; Fanning, C.M.; Calderón, M.; Niemeyer, H.; Griem-Klee, S.; Soto, F. 2016. The pre-Mesozoic rocks of northern Chile: U-Pb ages, and Hf and O isotopes. *Earth-Science Reviews* 152, 88-105.
- Vásquez *et al.*, 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 195-196: 93 p.

Eventos tectonotermales en el Complejo Acrecional Costero de Chile Central y su implicancia en el margen occidental de Gondwana

Álvaro Torres¹, Gonzalo Galaz¹

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copayapu 485, Copiapó, Chile

Introducción

Durante el Neoproterozoico hasta la mayor parte del Paleozoico, la evolución del margen occidental de Gondwana se caracterizó por una compleja historia de orógenos colisionales, no colisionales y el desarrollo de diversos complejos acrecionales (Hervé, 1988; Díaz-Alvarado, 2019). En este contexto el Complejo Acrecional Costero de Chile Central (CACCC), de edad paleozoica, aflora discontinuamente entre los 34° y 40°S. Las rocas pertenecientes a este complejo, en un comienzo fueron parte de una plataforma continental, constituida por sedimentos pelágicos, hemipelágicos y terrígenos, siendo depositados en un margen pasivo, durante el Devónico tardío al Carbonífero temprano (Hervé, 1988). Con el inicio de los procesos de subducción, durante el Carbonífero tardío, se instaure un arco magmático y se desarrolla un prisma de acreción, el cual evoluciona por medio de dos diferentes mecanismos; acreción frontal y acreción basal (Creixel et al., 2021; García-Sansegundo et al., 2023). Adicionalmente, en este complejo se distingue el desarrollo de dos series metamórficas paralelas al margen continental; la Serie Occidental, de alta presión y baja temperatura, y una Serie Oriental de alta temperatura y baja presión (Hervé, 1988).

Las diferentes asociaciones mineralógicas y eventos tectonotermales que registran las rocas del CACCC, han sido de suma controversia entre diversos autores, fundamentalmente debido a ciertas inconsistencias en la ocurrencia e interpretación temporal de su mineralogía, siendo resumido en el diagrama de deformación-metamorfismo-tiempo (DMt) de la figura 1A (Galaz et al., 2018). En base a un estudio petrográfico detallado de la Serie Oriental en la localidad de Tanumé, se reconocieron sus diversas asociaciones mineralógicas y eventos deformacionales, permitiendo ser relacionadas a diferentes eventos tectonotermales que afectaron a sus rocas. Estos eventos evidencian detalladamente los múltiples cambios que experimentó el margen occidental de Gondwana durante Paleozoico tardío y Mesozoico temprano.

Metodología

Inicialmente se recopilaban múltiples muestras de rocas de las diferentes unidades, alrededor de la localidad de Tanumé. Teniendo una principal atención en la representatividad de deformaciones y minerales termales. Posteriormente, a partir de las muestras obtenidas se confeccionaron nueve cortes transparentes. Estos cortes fueron descritos petrográficamente mediante un microscopio de luz polarizada, perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de Atacama. Por medio de la descripción petrográfica se enfatizó la identificación, reconocimiento, descripción mineralógica y texturales, evidenciando las diferentes microestructuras, tales como foliaciones, sombras de presión, etc. Con la información obtenida se ordenó con cada evento tectonotermal y se elaboró un diagrama de temporalidad relativa DMt.

Resultados

En las rocas del CACCC de la Serie Oriental, en la localidad de Tanumé, se reconocen dos unidades en términos de litología, metapelitas y metapsamitas que se presentan en forma de alternancias. Estas rocas presentan una deformación mayoritariamente en estado dúctil, caracterizado por el contraste de capas de diferentes competencias. Las metapelitas se presentan mayormente deformada y registran claramente los últimos eventos deformacionales. La foliación S_2 es fácilmente reconocible apreciándose con un ligero plegamiento, a diferencia de las metapsamitas. Esta última, debido a su mayor resistencia a la deformación, logra registrar una foliación S_1 a escala microscópica. Además, las unidades presentan grandes porfiroblastos de andalucita, estauroлита y granate.

En cuanto a los eventos tectonotermales a escala microscópica, se registran dos eventos de metamorfismo dinámico, dos eventos metamórficos termales y una tercera incipiente deformación. i) El primer evento deformacional (D_1) (foliación S_1) es reconocido por el plegamiento de microlitones de moscovita y cuarzo (Figura 1B). ii) Posteriormente se observan minerales de andalucita, estauroлита, granate, biotita e ilmenita, minerales termales, los cuales tienen un crecimiento estático y son bordeados por una penetrativa foliación S_2 (Figuras 1C, 1D, 1E). iii) Subsiguientemente al crecimiento de minerales termales, las rocas denotan una marcada segunda deformación (D_2) regional. El evento D_2 genera el plegamiento y casi obliteración de la foliación S_1 . Igualmente, genera una nueva foliación plano axial S_2 con el desarrollo de pliegues F_2 . Esta foliación S_2 se distribuye en forma penetrativa, paralela y levemente plegada, siendo afectada por una tercera deformación. La foliación S_2 , está constituida por moscovita, cuarzo, biotita, ilmenita y clorita, los cuales bordean a los minerales formados durante el primer evento termal. iv) Minerales de andalucita, estauroлита y clorita evidencian un segundo evento termal. Estos minerales tienen un crecimiento estático, conservando en su interior la foliación S_2 (Figuras 1F y 1G). v) Un tercer evento de deformación (D_3) se aprecia incipientemente, siendo reconocido por un plegamiento poco desarrollado de la foliación S_2 , sin lograr a formar una foliación S_3 (Figura 1G).

Discusión

Un evento D_1 , que es reconocible por el plegamiento de microlitones de moscovita y cuarzo, correspondería a los primeros cambios que experimenta el margen occidental de Gondwana, cambiando de un margen pasivo a un margen activo, generando una primera deformación durante el enterramiento de los metasedimentos del prisma acrecional durante los 345 ± 11 Ma (U-Pb) (Hervé, 1988; García-Sansegundo et al., 2023).

Posteriormente, grandes porfiroblastos de andalucita, estauroлита, granate, biotita e ilmenita, minerales termales, se exponen posterior al evento D_1 y previo al evento D_2 . Evidenciando la existencia de un primer evento termal durante el Paleozoico tardío.

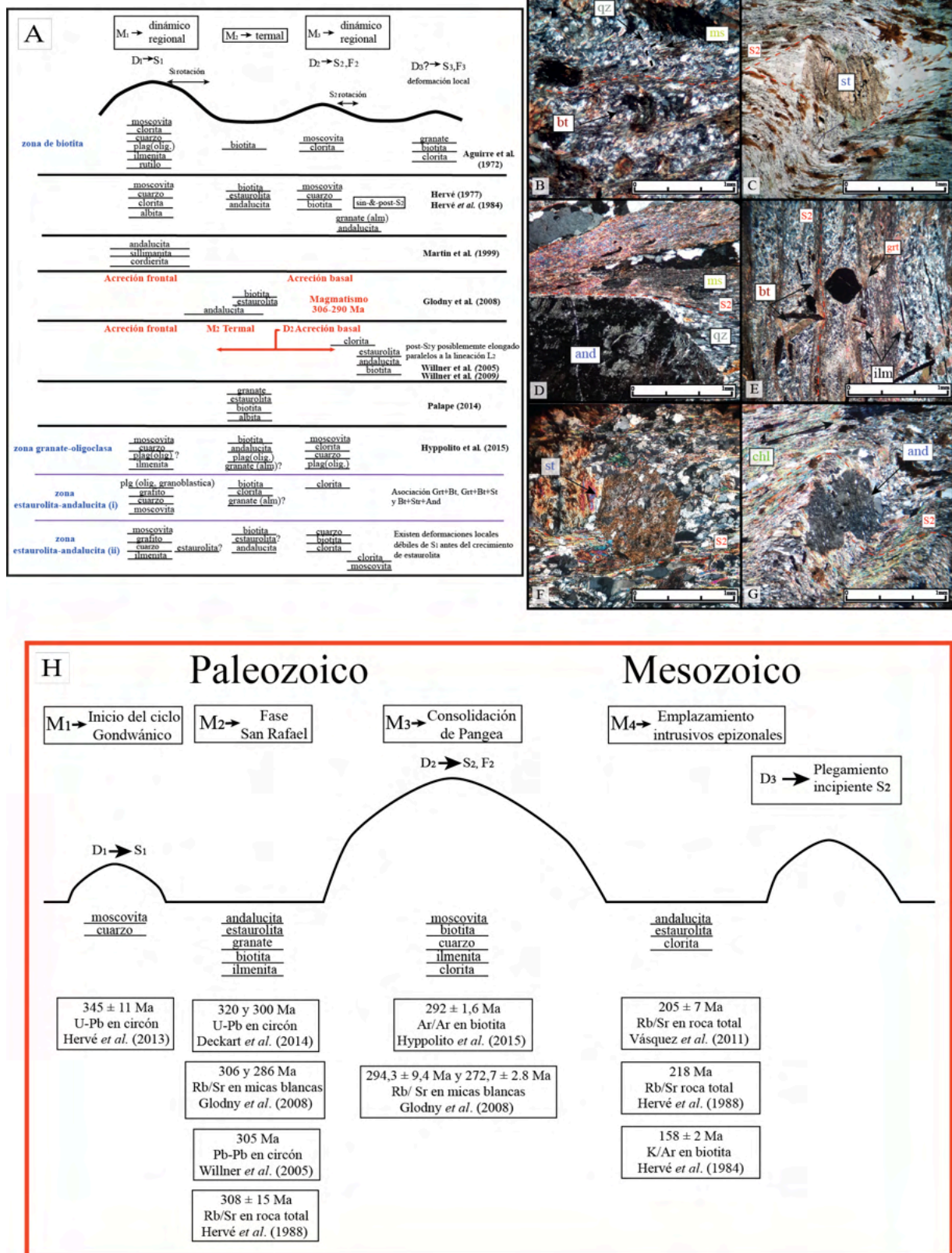


Figura 1. (A) DMT de la Serie Oriental (modificado de Galaz et al. (2018), detallando los estudios petrográficos realizados por Aguirre et al. (1972), Hervé (1977), Hervé et al. (1984), Martin et al. (1999), Willner et al. (2005, 2009), Palape (2014) e Hyppolito et al. (2015). **(B)** microlitones de moscovita, cuarzo y porfidoblastos de biotita previa a la foliación S₂. **(C)** estauroлита con sombras de presión en sus bordes. **(D)** andalucita bordeada por minerales de moscovita y cuarzo, foliación S₂. **(E)** porfidoblastos de granate y biotita previa a la foliación S₂. **(F)** plegamiento incipiente de la foliación S₂ compuesta por moscovita, cuarzo, clorita y biotita, y porfidoblastos de andalucita posterior a la foliación S₂. **(G)** blastos de estauroлита posterior a la foliación S₂. **(H)** Diagrama DMT, propuesto para el CACCC. Adicionalmente se han agregado las referencias históricas de dataciones para cada evento tectonotermal (Torres, 2022).

Este evento ocurre durante la fase orogénica San Rafael, causado por la intrusión del Batolito Costero de Chile Central (BCCC) en el prisma acrecional (CACCC) entre los 320 y 286 Ma (U-Pb, Rb/Sr, Pb-Pb) (Díaz-Alvarado et al., 2019).

Igualmente, más al norte del CACCC, se han evidenciado xenolitos granitos en Punta Cladita de 318,6 Ma (U-Pb), domos riolíticos y tobas con edades entre 318 y 304 Ma (U-Pb), un *peak* metamórfico en el Complejo Metamórfico El Loa entre 318 y 316 Ma (U-Pb) (Creixell et al., 2021). Permite sugerir una prolongación del primer evento termal más al norte del CACCC, relacionado con el desarrollo de un arco Carbonífero-Pérmico muy cercano al margen occidental de Gondwana.

Un evento deformacional D₂ es reconocido por minerales de moscovita, cuarzo, biotita, ilmenita y clorita conformando la foliación S₂. Este segundo evento deformacional ocurrió entre los 294 y 272 Ma (Ar/Ar, Rb/Sr), posterior al emplazamiento del BCCC y a sus asociados minerales termales (Hyppolito et al., 2015; Torres, 2022). La presencia de rocas volcánicas con firmas OIB en el río Maule, sugiere que un relieve oceánico fue acumulado en el margen occidental de Gondwana durante el límite Carbonífero-Pérmico (301 y 296 Ma). Asimismo, en torno a Huentelauquén, igualmente se ha planteado la acumulación de un relieve oceánico durante el Pérmico medio (274 y 260 Ma) (Díaz-Alvarado et al., 2019). Este evento D₂ marca un *peak* en los procesos deformacionales, causando la exhumación de las rocas del prisma, su emplazamiento hacia el Este sobre cuencas de antearco (García-Sansegundo et al., 2023) y precisando el fin de los procesos acrecionales del Paleozoico tardío.

Nuevamente minerales de andalucita y estauroлита, posterior al evento D₂, permiten afirmar un segundo evento termal. Este segundo evento termal, tendría como origen el emplazamiento de intrusivos epizonales, luego de los procesos acrecionales del Paleozoico tardío. Estos intrusivos corresponderían al stock Pichilemu, conformado por los plutones Pichilemu y Los Ciruelos de edades entre 218 y 158 Ma (K/Ar, Rb/Sr) (Vásquez et al. 2011). La actividad intrusiva del Triásico tardío en la Cordillera de la Costa de Chile Central se caracteriza por una serie de granitoides epizonales ricos en sílice que instruyeron al CACCC (Rossel et al., 2023). Este segundo evento termal podría ser registrado entorno a estos pequeños intrusivos, que afloran irregularmente por la Cordillera de la Costa de Chile Central (e.g. Granito La Estrella, Granito Constitución, Stock Hualpén). Por otro lado, el emplazamiento de estos intrusivos epizonales, se habrían producido durante el Triásico en condiciones extensionales (Rossel et al., 2023) o en el Jurásico producto de la fragmentación de Gondwana (Díaz-Alvarado et al., 2019).

Un evento D₃ es reconocido por un plegamiento incipiente de la foliación S₂. García-Sansegundo et al. (2023), consideran este tercer evento con la propagación de la deformación hacia el Este y el final del emplazamiento del BCCC. No obstante, Torres (2022) e Hyppolito et al. (2015), consideran que el emplazamiento del BCCC ocurre solo entre el evento D₁ y evento D₂. Proponiendo que el evento D₃ es sólo producto de la propagación de la deformación hacia el Este, durante la fragmentación de Pangea y ocurriendo posterior al segundo evento termal.

Conclusiones

En las rocas del CACCC de la Serie Oriental, en la localidad de Tanumé, se reconocen una alternancia polideformada compuesta de metapelitas y metapasamitas. A su vez, estas rocas registran diversos eventos deformacionales, siendo mayormente evidenciados en metapelitas. En cuanto a los eventos tectonotermales, se registran los siguientes; dos eventos de metamorfismo dinámico, dos eventos metamórficos termales y una tercera incipiente deformación, siendo resumidos en el DMt de la figura 1H. Estos eventos permiten ser relacionados a grandes cambios que experimentó el margen occidental de Gondwana durante el Paleozoico tardío hasta el Mesozoico temprano.

El primer evento de deformación ocurre durante el inicio del ciclo Gondwánico, estableciéndose los procesos de subducción. Mientras que el segundo evento deformacional de carácter regional, correspondería al *peak* de la deformación. Una tercera deformación, que se reconoce por el plegamiento incipiente de la foliación S₂, es evidencia del avance de la deformación hacia el Este durante la fragmentación de Pangea.

En cuanto a los eventos termales; el primer evento termal ocurre entre el evento D₁ y el evento D₂, siendo relacionado a la intrusión del BCCC, originado durante el inicio de la fase San Rafael y podría ser prolongado más al norte del CACCC. Mientras que el segundo evento termal, es causado por el emplazamiento de granitoides epizonales en el CACCC, durante el Mesozoico temprano.

Palabras Clave: Complejo Acrecional Costero de Chile Central, deformación, metamorfismo, eventos tectonotermales.

Referencias:

- Creixell, C., Sepúlveda, F., Álvarez, J., Vásquez, P., Velásquez, P. 2021. The Carboniferous onset of subduction at SW Gondwana revisited: Sedimentation and deformation processes along the late Paleozoic forearc of north Chile (21°–33° S). *J. S. Am. Earth Sci.*, 107, 103149.
- Díaz-Alvarado, J., Galaz, G., Oliveros, V., Creixell, C., Calderón, M. 2019. Fragments of the late Paleozoic accretionary complex in central and northern Chile: Similarities and differences as a key to decipher the complexity of the late Paleozoic to Triassic early Andean events. In *Andean Tectonics*. 509-530.
- García-Sansegundo, J., Fariás, ..., García-Moreno, O. 2023. Paleozoic Gondwanan structure along the Maule river valley between Toconey and Constitución (35.4° S, Chilean Pacific Coast). *J. S. Am. Earth Sci.*, 123, 104246.
- Galaz, G., Torres, A., Núñez, M., Rojas, P., Contreras, M. 2018. Coastal Accretionary Prism of Central Chile (~34°–41°S): review and preliminary investigation, Chile. In *XV CGCh*, Concepción, Chile.
- Hervé, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in southern Chile. *Episodes*, 11 (3), 183-188.
- Hyppolito, T., Juliani, C., ..., Hall, C. 2015. LP/HT metamorphism as a temporal marker of change of deformation style within the Late Palaeozoic accretionary wedge of central Chile. *J. Metamorph. Geol.*, 33(9), 1003–1024.
- Rossel, P., Gianni, G. M., Reinoso, V., Fanning, C. M., Ducea, M. N., Muñoz, T., Salvat, D. 2023. Origin of Late Triassic Granitoids of the Coastal Cordillera of Southern Central Chile (34°–37° S): Multi-Isotopic Evidence of Slab Tearing Effects on Pre-Andean Magmatogenesis. *Tectonics*, 42(2).
- Torres, A. 2022. Petrografía y deformación del Complejo Acrecional Costero de Chile Central. (Tesis para optar al grado de Geólogo). Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.
- Vásquez, P., Glodny, J., Franz, G., Frei, D., Romer, R. L. 2011. Early Mesozoic Plutonism of the Cordillera de la Costa (34–37° S), Chile: constraints on the onset of the Andean Orogeny. *J. Geol.*, 119(2), 159-184.

Esquistos de Quiñenco, registro de la Serie Occidental en la Cordillera de Nahuelbuta, región del Biobío, Chile

Ricardo Velásquez¹, Juan Carlos Moral², Christian Creixell¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

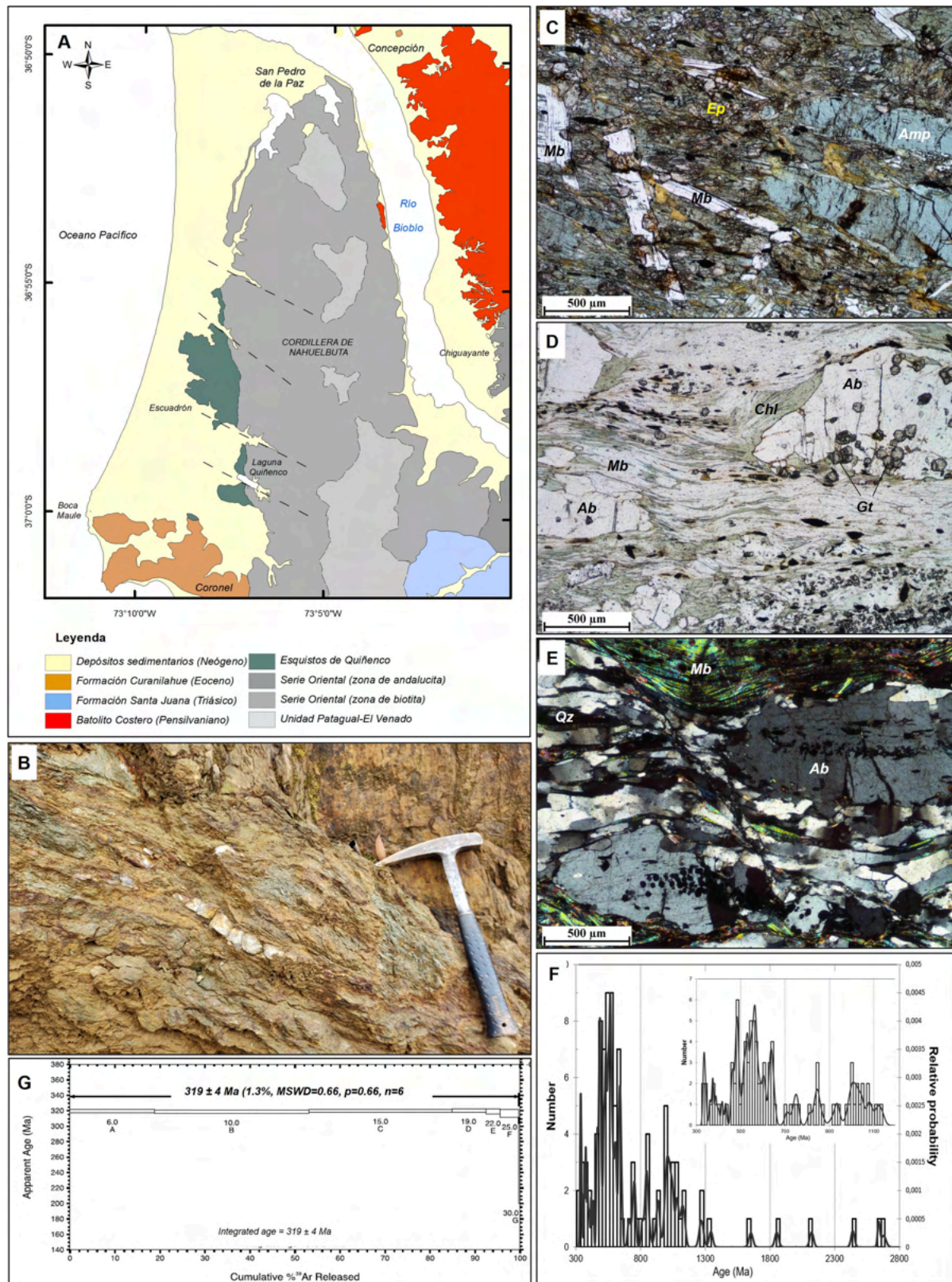
(2) Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción

La Cordillera de Nahuelbuta es un segmento de la Cordillera de la Costa del centro sur de Chile, localizada entre los ríos Biobío e Imperial, y mantiene uno de los mejores registros del basamento metamórfico formado durante el proceso acrecionario del extremo suroeste de Gondwana a finales del Paleozoico (e.g., Hervé, 1988). Trabajos regionales como los de Hervé (1977; 1988), indican que gran parte de este cordón montañoso está compuesta por rocas metamórficas de protolito sedimentario afectadas por una aureola metamórfica regional provocada por la intrusión del Batolito Costero carbonífero (Serie Oriental, Aguirre et al., 1972), mientras que la Serie Occidental registra presiones mayores asociadas a dominios más profundos dentro del sistema acrecionario aflora, al menos en la Cordillera de Nahuelbuta, solo al sur del lago Lanalhue ~38°S (e.g., Hervé et al., 2013; Romero et al., 2020). La presente contribución expone los primeros antecedentes de rocas asociables a la Serie Occidental en el segmento norte de la Cordillera de Nahuelbuta. En el borde occidental de la Cordillera de Nahuelbuta, entre los ~ 36°55' - 37°00' S, aflora una asociación de rocas metamórficas cuyas características de campo, asociaciones litológicas, deformación y edad, permiten agruparlas dentro de una unidad litoestratigráfica común, presentada en este trabajo como "Esquistos de Quiñenco". Estos poseen su mejor exposición en los alrededores de la laguna Quiñenco (37°S / 73°07'W), comuna de Coronel, donde están cubiertos por depósitos marino/litorales principalmente del Holoceno (Figura A). Estos esquistos conforman una franja continua de orientación NNW-SSE, desde la laguna La Posada, por el norte, hasta, por lo menos, los alrededores de la laguna Quiñenco, por el sur. Si bien gran parte de la zona que abarca esta unidad se encuentra densamente cubierta por el desarrollo de suelos forestales, es posible acceder a buenos afloramientos en laguna Quiñenco, Calabozo, Hito Galvarino, Fundo Escuadrón, Boca Maule y Parque Alessandri.

Los Esquistos de Quiñenco se encuentran en contacto por falla con la Serie Oriental, al menos en las inmediaciones de la laguna Quiñenco, donde cataclasitas y fábricas tipo S-C (~ N30°E/40SE) permiten inferir una estructura inversa de bajo ángulo y orientación NNE-SSW (ver también Moral et al., este congreso). Sin embargo, la prolongación hacia el norte de este contacto no es claro, ya que la presencia de filitas con porfiroblastos de biotita, característicos de la zona de biotita de la Serie Oriental, sugiere que el contacto entre ambas unidades se encontraría desplazado hacia el oeste y sería, probablemente, un contacto gradacional. Lo anterior es consistente, probablemente, con lo observado en el basamento metamórfico de Cordillera de la Costa de la región del Maule, entre Empedrado y Cauquenes (35°30'-36°00'S) donde también se ha interpretado un contacto transicional entre las series Occidental y Oriental (Astudillo et al., este congreso).

La unidad se compone de varios tipos litológicos, los que se distribuyen en bandas intercrecidas, sin un patrón estratigráfico claro, lo que se relaciona posiblemente a las características originales de sus protolitos. Las litologías principales de esta unidad incluyen esquistos verdes, esquistos de albita, esquistos de mica y granate, y filitas subordinadas. Los esquistos verdes son rocas de grano medio, con foliación bien desarrollada según planos de orientación N50°-60°E/30-40°SE aunque también se observan foliaciones subverticales N60°E/80SE asociadas a bandas de cuarzo de segregación. En general poseen texturas predominantemente nematoporfiroblásticas a porfirolepidoblásticas, con desarrollo de matriz característicamente verdosa (Figura B). Los porfiroblastos corresponden, en algunos sectores, a cristales de albita de hasta 4 mm de longitud, con abundantes inclusiones de epidota, zoisita prismática orientada, granate y grafito, y también a cristales de anfíbola de hasta 2 mm de largo y dispuestos paralelos a la foliación principal de la roca (Figura C). Otros porfiroblastos, menos comunes, corresponden a cristales de mica blanca, post-tectónicos, discordantes de la foliación principal y levemente deformados. Estos esquistos poseen una matriz nematoblástica que rodea a los porfiroblastos de albita, compuesta por cristales orientados, y relativamente equivalentes en porcentaje, de anfíbola, epidota, clorita, zoisita, cuarzo y albita, con tamaños que no superan los 0,5 mm de longitud, y en menor cantidad, titanita. Además, y localmente, existen variaciones locales a rocas extremadamente ricas en zoisita y/o titanita. Los esquistos de albita, y de albita-clorita, exhiben una fábrica esquistosa y textura parcialmente lepidogranoblástica a porfiroblástica (Figura D). Posee dominios donde la matriz es rica en cuarzo granoblástico alargado siguiendo la foliación principal de la roca (foliación S₂), en asociación con clorita y mica blanca, ambas elongadas, con dominios ricos en mica blanca (Figura E), orientadas de acuerdo con la foliación principal, las que se asocian también a abundantes inclusiones de granate. La matriz rodea a porfiroblastos pre y sin-tectónicos de albita (Figura D) de hasta 5-6 mm de largo, los que registran abundantes inclusiones de grafito, epidota y granate. Las inclusiones de grafito se encuentran orientadas de manera oblicua a la foliación principal S₂, lo que muestra un evento deformativo previo a la nucleación de la albita. Localmente, las microinclusiones de granate alcanzan ~30% del total de los porfiroblastos de albita (Figura D). Estas microinclusiones no superan los 0,1 mm de diámetro, y corresponden a cristales dodecaédricos euhedrales. Otras litologías menos comunes son esquistos de mica-granate, y filitas, así como rocas cataclásticas en el contacto con la Serie Oriental.

Se registran 3 eventos de deformación en los Esquistos de Quiñenco. El evento de deformación 1 (D₁) se registra en el sector de Fundo Escuadrón, a la altura del Hito Galvarino, donde los porfiroblastos de los micaesquistos de albita-clorita, presentan inclusiones pre-tectónicas de grafito, formando pliegues isoclinales apretados como registro de una foliación S₁ relicta. El evento de deformación 2 (D₂) forma parte de la foliación principal S₂ registrada en el Fundo Escuadrón con un rumbo promedio de NE-SW, similar a las foliaciones S₂ observadas en las inmediaciones de la laguna Quiñenco, donde además se registra un aumento en el ángulo de esta foliación, cerca del contacto con la Serie Oriental. Finalmente, bandas tipo *kink* registran un evento D₃, además de crenulaciones en micaesquistos de albita-clorita y esquistos verdes con ejes de pliegue con buzamiento de 95° al E, a la altura del lineamiento WNW-ENE entre Escuadrón y Quiñenco, y paralelo a la laguna Quiñenco (Moral et al., este congreso). Además, las orientaciones de vetillas de cuarzo y cuarzo de segregación presentan 3 tendencias generales: NE-SW vinculadas a la foliación S₂, WNW-ENE posiblemente vinculada a lineamientos locales (Figura A), y finalmente NW-SE.



A) Mapa geológico simplificado del extremo norte de la Cordillera de Nahuelbuta, modificado de Velásquez et al. (en prep.). **B)** Aspecto general de los esquistos verdes en la localidad de Calabozo, Coronel. **C)** Fotomicrografía de un esquistos verde con desarrollo de porfiroblastos sin-tectónicos de anfíbola y post-tectónicos de mica blanca, inmersos en una matriz compuesta por epidota, anfíbola, zoisita, titanita, cuarzo y albita. **D)** Fotomicrografía de un esquistos de albita y granate, con cristales de granate tanto en la matriz como en inclusiones dentro de los porfiroblastos de albita (luz polarizada plana, objetivo 5X). **E)** Fotomicrografía de un esquistos de albita y granate, con desarrollo de matriz con dominios ricos en mica (arriba) y otros ricos en cuarzo; los porfiroblastos de albita poseen inclusiones de grafito y granate (nicoles cruzados, 5X). **F)** Histograma de los circones detríticos obtenidos desde un esquistos de albita. **G)** Plateau Ar-Ar mica blanca desde un esquistos de albita.

Para caracterizar el protolito, se obtuvo una edad U-Pb en circones detríticos desde un esquisto de albita que aflora al noroeste de la laguna Quiñenco (UTM 5905288/667074), cuya población más joven tiene un promedio ponderado de ca. 337 Ma, interpretado como una edad máxima de depositación para el protolito de esta roca, situando este evento cercano al Carbonífero Inferior (Misisipiano Medio). Esta edad es consistente con los datos de circones detríticos publicados por Hervé et al. (2013) para el extremo norte de la Serie Occidental (34-35,5°S), y, a su vez, más jóvenes que los datos publicados por Romero et al. (2020), de ca. 370-350 Ma, para afloramientos localizados solo a 2,5 km, en el sector de Yobilo. No existen, en esta latitud, rocas ígneas del Misisipiano que pudiesen constituir la fuente de los circones de esta edad. El estudio estadístico de las poblaciones de circones (Figura F), sugieren importantes fuentes de ca. 490-460 Ma (Orogenia Famatiniana), 640-630 Ma (Orogenia Brasiliana), y débiles peaks devónicos (5 granos, 400-360 Ma), abundantes en la Serie Occidental al sur de la Zona de Falla Lanalhue (38°S, Hervé et al., 2013, Romero et al., 2020). En el mismo esquisto, se obtuvo una edad Ar-Ar de calentamiento por etapas de ca. 319,0±4,0 Ma, en cristales de mica blanca (Figura G) dispuestos coherentemente con la foliación principal de la roca (S₂), la que representa el paso del esquisto por la temperatura de cierre de la mica blanca, probablemente, posterior al *peak* deformativo bajo un régimen de metamorfismo P/T de grado medio, de acuerdo a la asociación mineral descrita clásicamente para la facies de esquistos verdes (clorita+albita+epidota+anfíbola+cuarzo). Este dato geocronológico es muy similar a aquellos publicados para la Serie Occidental, hacia el norte, en la localidad de Punta Sirenas (34°30'S): ~ 319 Ma en mica blanca en un esquisto mica-granate (Willner et al., 2005) y ~ 322 Ma en fengita de una anfíbolita retrógrada (Hyppolito et al., 2014). También, es similar a edades Ar-Ar para anfíbolas de anfíbolitas con granate del Complejo Metamórfico Punta de Choros en el norte de Chile (29°S, Creixell et al., 2016). Adicionalmente, desde un esquisto verde del sector El Calabozo (UTM 5903805/667729), se dataron micas blancas desarrolladas de manera discordantes a la foliación de la roca, interpretadas como micas post-tectónicas, cuya edad *plateau* se calculó en ca. 305 Ma, asociable a etapas avanzadas de exhumación del prisma de acreción, o bien, metamorfismo termal llevado a cabo durante etapas postrimeras del Complejo Plutónico Concepción (BCS).

Los datos presentados en este trabajo permiten, de manera preliminar, caracterizar y situar temporalmente diferentes etapas de deformación durante la incorporación de material profundo al canal de subducción, seguido de deformación e incorporación de fluidos durante el desarrollo del complejo acrecionario.

Palabras Clave: metamorfismo, serie occidental, esquistos verdes, paleozoico, Quiñenco.

Financiamiento: Este trabajo se enmarca en el levantamiento y publicación de la carta geológica Concepción-Talcahuano, financiada por el Plan Nacional de Geología de Sernageomin, con el apoyo del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción.

Referencias:

- Astudillo et al. (2023, este congreso). Características del Basamento Metamórfico entre Empedrado y Cauquenes (35°30'-36°00'S y 72°00'-72°30'O), región del Maule y sus implicancias metamórficas y tectónicas. Congreso Geológico Chileno 2023.
- Creixell et al. (2016). Geodynamics of Late Carboniferous/Early Permian forearc in north Chile (28°30'-29°30'S). *Journal of the Geological Society* 173 (5): 757-772.
- Hervé (1977). Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, south central Chile. In: Ishikawa, T. and Aguirre, L (eds.). *Comparative studies on the Geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile*, 1st report, Tokyo, p. 1-51.
- Hervé (1988). Late Paleozoic Subduction and Accretion in Southern Chile, Episodes, v. 11, 183-188.
- Hervé et al. (2013). Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research* 23, 1122-1135.
- Hyppolito et al. (2014). Late Paleozoic onset of subduction and exhumation at the western margin of Gondwana (Chilenia Terrane): counterclockwise P-T paths and timing of metamorphism of deep-seated garnet-mica schist and amphibolite of Punta Sirena, Coastal Accretionary Complex, central Chile (34° S). *Lithos* 206-207, 409-434.
- Moral et al (2023, este congreso). Eventos de deformación del basamento metamórfico paleozoico entre los 36°45'-37°10'(Provincia de Concepción, Chile).
- Romero et al. (2020). Sedimentary provenance of the Late Paleozoic metamorphic basement, south-central Chile: Implications for the evolution of the western margin of Gondwana, *International Geology Review*, 62:5, 598-613.
- Velásquez et al. (en preparación). Geología del área Concepción-Talcahuano, escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. En preparación.
- Willner et al. (2005). Time markers for the evolution and exhumation history of a Late Paleozoic paired metamorphic belt in North-Central Chile (34°-35° 30' S). *Journal of Petrology* 46, 1835-1855.

A continuous 5-kyr-long record of great megathrust earthquakes at Isla Santa Maria, Chile, deduced from coastal plain geomorphology

Diego Aedo¹⁻², Marco Cisternas²⁻³, Dominik Brill⁴, Daniel Melnick²⁻⁵

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Millennium Nucleus the Seismic Cycle Along Subduction Zones CYCLO, Valdivia, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Instituto de Geografía, Valparaíso, Chile

(4) University of Cologne, Institute of Geography, Cologne, Germany

(5) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Valdivia, Chile

Great historical earthquakes ($M > 8$) have occurred every ~ 100 yr in the south-central Chile Maule segment during the past 500 years. Charles Darwin and Robert FitzRoy documented coastal seismic uplift associated with the great Chile earthquake of 1835 ($M > 8.5$) at Isla Santa Maria, located 75 km landward of the Chile trench. In 2010, another similar earthquake (M_w 8.8) uplifted the island by 2 meters, closing the seismic cycle in south-central Chile. A coastal plain at the island has been built by persistent progradation during previous seismic cycles generating a succession of beach ridges and swales recording relative sea-level changes including coseismic uplift and slow interseismic subsidence during the last 5000 years. These ridges had been attributed to the uplift of the island during earthquakes by a previous study published before the 2010 event. However, the detailed analysis of coastal evolution between 1941-2021, including the earthquake, allowed a better comprehension of the processes responsible for the coastal accretion and formation of beach ridges. Based on this knowledge, we have developed a history of Holocene beach-ridge sequence using a 15-cm digital elevation model, GPR subsurface imaging, with C14 and IRL dating. Using the contour curvature of the topography, we mapped 26 ridge-swale pairs continuous for 3 km along the coastal plain. We developed a Bayesian age-distance model using Oxcal finding 3 distinct plain formation stages: i) between 4.5-2.7 kyr with a ~ 300 -year interval between ridges and progradation rate of 0.3 m/yr; ii) 2.3-2.7 kyr with a ~ 50 yr interval and progradation rate between 1 and 3 m/yr (similar to estimates immediately after the 2010 earthquake); and iii) 2.3-0.6 kyr with ~ 170 yr interval and progradation rate of 0.4 m/yr (similar to the decades before the 2010 earthquake). By using the 2010 earthquake as a modern analogue, we interpret that each beach ridge-swale pair represents a complete seismic cycle that resulted in permanent uplift of the island. The time between beach ridges in the most recent period of coastal plain growth (since 2.3 kyr) is coincident with the historical recurrence time abandonment, supporting our interpretation. Splay faulting and tilting occurred during the 2010 earthquake, and therefore changes in recurrence time might reflect variations in upper plate versus interplate sources, which we will explore with numerical modeling. Our study highlights the application of quantitative geomorphology with high-resolution topography to decipher paleoseismic records in tectonically active coastal zones.

Keywords: Coastal geomorphology, Earthquake geomorphology, Chile 2010 earthquake, Paleoseismology, Beach ridge plain.

Cálculo de peligrosidad sísmica para el segmento del Terremoto de Valdivia basado en paleosismicidad, eventos históricos y sismicidad

Catalina Cabello Parada¹⁻³, Gonzalo Montalva²⁻³, Francisco Acuña²⁻³

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Edmundo Larenas 219, 4070371, Concepción, Chile

(3) Proyecto Núcleo Milenio El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción, CYCLO, Chile

Registros de paleosismicidad no son comunes y en general su proceso de datación conlleva grandes incertidumbres y solapes en la fecha de ocurrencia de los eventos, lo que dificulta el análisis e interpretación de esta información. Sin embargo, el pronóstico de futuros terremotos depende de su frecuencia, número de eventos pasados y el tiempo transcurrido desde el último evento. Los catálogos paleosísmicos (eventos prehistóricos) y los registros de sismicidad histórica son la fuente de información más importante para caracterizar la ocurrencia de megaeventos con largos periodos de recurrencia (por ej., Valdivia 1960, Maule 2010, etc.), dado que permiten caracterizar más de un ciclo sísmico.

Zöller (2018) propone que el tiempo necesario para que ocurra el siguiente gran evento depende de la tasa de sismicidad de eventos pequeños e intermedios ocurridos entre terremotos mayores, indicando que el uso del catálogo instrumental de un corto periodo de tiempo (años o décadas), puede ser un buen complemento para el cálculo de periodos de recurrencia de megaeventos.

Se utilizaron datos de paleosismicidad (Morneaut et al., 2018), sismicidad histórica enmarcada en el segmento de subducción Valdivia (utilizando la zonificación propuesta por Molina et al., 2021) y registros sísmicos instrumentales del Centro Sismológico Nacional (CSN) para el periodo comprendido entre 2000 y 2021, con magnitudes entre Mw3.0 hasta Mw7.6 dentro de la misma área. Se trabajó con dos distribuciones estadísticas, una independiente del tiempo (Poisson o distribución exponencial) y otra dependiente de tiempo (Brownian Passage Time, o BPT).

Esta última distribución estadística combina las distintas fuentes de información mencionadas para calcular la recurrencia de mega eventos (Mw>8.6), cuantificando las incertidumbres asociadas. Los resultados serán, además, comparados con los publicados por Acuña et al. (2022), quienes utilizaron el mismo catálogo de paleosismicidad, pero otra metodología de cálculo.

Se analiza la capacidad predictiva de los modelos para el Terremoto de Valdivia 1960, a partir de una fecha de análisis previa a éste (1940) y con ventanas temporales de 50 y 100 años, y un pronóstico situándonos en 2022 para ventanas de 50 y 100 años en el futuro.

Palabras Clave: Brownian Passage Time, Peligrosidad Sísmica, Registro instrumental, Paleosismicidad

Referencias:

- Acuña, F., Montalva, G. A., & Melnick, D. (2022). How Good is a Paleoseismic Record of Megathrust Earthquakes for Probabilistic Forecasting? *Seismological Society of America*, 93(2A), 739-748.
- Moernaut, J., M. Daele, K. Fontijn, K. Heirman, P. Kempf, M. Pino, G. Valdebenito, R. Urrutia, M. Strasser, & M. De Batist (2018). Larger earthquakes recur more periodically: New insights in the megathrust earthquake cycle from lacustrine turbidite records in south-central Chile, *Earth Planet. Sci. Lett.* 481, 9– 19, [doi: 10.1016/j.epsl.2017.10.016](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.016).
- Molina, D., Tassara, A., Abarca, R., Melnick, D., & Madella, A. (2021). Frictional Segmentation of the Chilean Megathrust From a Multivariate Analysis of Geophysical, Geological, and Geodetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6), e2020JB020647.
- Zöller, G. (2018). A statistical model for earthquake recurrence based on the assimilation of paleoseismicity, historic seismicity, and instrumental seismicity, *J. Geophys. Res.* 123, no. 6, 4906–4921, [doi: 10.1029/2017JB015099](https://doi.org/10.1029/2017JB015099).

Geoportal del Núcleo Milenio CYCLO como herramienta de compilación de resultados, visualización y divulgación

Catalina Cabello Parada¹⁻⁴, Carolina Peña³⁻⁴, Gonzalo Montalva²⁻⁴, Andrés Tassara¹⁻², Daniel Melnick³⁻⁴

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Edmundo Larenas 219, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción 4070409, Concepción, Chile

(3) Universidad Austral, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Edificio Emilio Pugín, Av. Eduardo Morales Miranda, Valdivia, Chile

(4) Proyecto Núcleo Milenio El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción, CYCLO., Chile

El Geoportal implementado por el Proyecto Núcleo Milenio CYCLO es una herramienta que ha sido desarrollada con el objetivo de abordar los desafíos asociados con el acceso y la visualización de los resultados de investigación en el campo de la sismología, la ingeniería y la geología. En los proyectos de investigación se generan grandes cantidades de datos y resultados que pueden ayudarnos a entender los distintos fenómenos asociados a la sismología, sin embargo, que dichos resultados lleguen a otros grupos de investigación interesados en el área no siempre es fácil. Esta falta de difusión y acceso limitado a los resultados puede resultar en una duplicación innecesaria de esfuerzos y en la pérdida de oportunidades para generar conocimiento de manera colaborativa.

El Geoportal del Proyecto Núcleo Milenio CYCLO ha sido implementado como una herramienta que permite superar estas barreras y promover la accesibilidad de los resultados de investigación. A través de su interfaz intuitiva y amigable, es posible explorar y visualizar de forma sencilla, solo siendo necesario conocimientos mínimos en el área. Este visualizador se ha desarrollado teniendo en cuenta tanto a los investigadores expertos en el tema como a aquellos agentes tomadores de decisiones.

En cuanto a su estructura, esta está basada en cuatro pestañas principales: Fuente sísmica, Análisis de peligrosidad sísmica probabilístico (PSHA), Análisis de peligrosidad sísmica determinístico (DSHA) y Licuación. Cada una de ellas con distintas opciones en su interior que permitan explorar los resultados. Por ejemplo, la pestaña de PSHA permite visualizar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos y su impacto potencial, lo que resulta invaluable para la planificación de infraestructuras y la gestión del riesgo, mientras que la pestaña de DSHA se enfoca en lo que podría ocurrir en un lugar específico, permitiendo reconocer los efectos sísmicos en un área en particular.

Por otra parte, además de las pestañas principales, el Geoportal del Proyecto Núcleo Milenio CYCLO ofrece una serie de menús que facilitan el acceso a las publicaciones científicas generadas en el marco de la investigación, y a un glosario donde se explican los conceptos utilizados para profundizar en los conocimientos.

Palabras Clave: Geoportal, Visualización, Difusión.

Deslizamientos post-sísmicos y pre-inter-sísmicos del Terremoto de Pisagua Mw 8.1 2014, Chile

Daniel Cabezas Leyton¹⁻², Mahesh Shrivastava¹⁻², Gabriel González¹⁻², Roberto González¹⁻²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

El 1 de abril de 2014, el Terremoto de Pisagua (Iquique) Mw 8.1, proseguido por una réplica Mw 7.6, rompen parcialmente un segmento históricamente acoplado de la interfase de subducción en el norte chileno. A casi una década de este evento, la actividad post-sísmica no es del todo conocida. El presente estudio busca describir los desplazamientos post sísmicos del Terremoto de Pisagua 2014, y detectar si el bloqueo de la interfase de subducción se ha renovado, entrando en una fase pre-inter-sísmica. La metodología aplicada consiste en un modelado numérico e inversión de datos GPS mediante el software SDM (Steepest Descent Method). La inversión es aplicada en base a un modelo homogéneo con coeficiente de Poisson = 0.25, sobre un segmento de subducción entre las latitudes 18°S - 22°S, longitudes 69° - 73°W y profundidades máximas ~80 km, considerando un período post-sísmico de cuatro años después de las rupturas cosísmicas. Para el sistema de coordenadas local, se utiliza la notación de Aki y Richards, en donde las direcciones X - Y - Z corresponden hacia el norte, este y abajo, respectivamente, lo que conlleva a que ángulos de rake positivos medidos en sentido antihorario representen deslizamientos de tipo inverso, y negativos a normales. Para los cálculos cosísmicos, se restringió el rake entre el rango [+70°, +115°], mientras que para los post-sísmicos se determina libre. Los resultados indican que, a lo largo de los cuatro años, los deslizamientos de la interfase se incrementan logarítmicamente y disminuyen sus velocidades, hasta alcanzar un máximo acumulado de 2.8 metros. Una mayor parte de la distribución de estos deslizamientos se concentró en zonas *down-dip* de la ruptura, dentro de la zona sismogénica, a profundidades entre 25 - 50 km. Debido a estas características, esta porción representa el *afterslip* del terremoto. Asumiendo que dicho *afterslip* está controlado por leyes de fricción tipo *rate-and-state* con deslizamiento estable, es posible estimar el tiempo de relajación elástico del *afterslip* (t_R) mediante la ecuación $S(t) = VL \times t_R \times \log[1 + d(\exp(t/t_R) - 1)]$, obteniéndose un valor de 2,2 años. Por otra parte, desde seis meses a un año después del terremoto, se identifican deslizamientos con rake predominante hacia los rangos [+20°, +110°], a diferencia luego de dos años, donde el rake principal rota hacia el rango [-150°, -160°], indicando *backslip*. Esta tendencia se mantiene hasta los cuatro años, junto con un estancamiento del progreso de los desplazamientos superficiales y deslizamientos máximos. Por tanto, se sugiere que durante los primeros 2,2 años de la fase post sísmica, el *afterslip* fue el mecanismo post-sísmico dominante, desarrollándose principalmente entre las latitudes 19°S a 20.7°S, en zonas *down-dip* de la ruptura. Luego, se da lugar a procesos pre-inter-sísmicos como el inicio del rebloqueo de la interfase en los 9 - 35 km, aunque debe tomarse con cautela debido a la poca resolución en zonas próximas a la fosa (9 -15 km).

Palabras Clave: Terremoto de Pisagua 2014, Deslizamientos post-sísmicos, Afterslip, SDM (Steepest Descent Method).

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado económicamente por la beca de iniciación FONDECYT 11200558.

Agradecimientos: Se agradece al Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) por la prestación de sus servicios.

Caracterización de la segmentación friccional en las principales zonas de subducción global

Catalina Castro Ibáñez¹, Andrés Tassara²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

Las zonas de subducción son regiones en que convergen placas tectónicas, y donde la placa de mayor densidad se subduce debajo de la otra, formándose así la fosa oceánica. En estos márgenes convergentes, se producen varios procesos físicos, entre ellos los terremotos, que son producto de la interacción y contacto entre las placas. En estos límites se han generado los terremotos más grandes registrados en la Tierra, producto de la actividad sísmica permanente en las zonas, de particular interés de estudio.

Intentando determinar los factores que controlan la extensión de grandes terremotos de subducción a lo largo del margen Chileno, Molina et al. (2021) obtienen un modelo de segmentación friccional del megathrust a partir del análisis multivariable de datos geofísicos, geológicos y geodésicos. Para ello utilizan el método de análisis por componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), es decir, un método estadístico derivado del álgebra lineal que se utiliza para reconocer patrones en los datos a fin de resaltar las similitudes y diferencias entre ellos. En dicho artículo, se utiliza el PCA para cuantificar los patrones espaciales comunes entre las variables utilizadas, las que corresponden a los datos de anomalías de gravedad, el bloqueo geodésico y la fricción a partir de la cuña de Coulomb, lo que también involucra identificar las combinaciones lineales de estas variables. En los resultados, destaca que el modelo propuesto coincide y permite compararlo con la extensión longitudinal de la ruptura de los terremotos de gran magnitud, como Maule 2010 y Valdivia 1960, entre otros destacados.

Siguiendo la línea del trabajo mencionado, además de estudiar estas interacciones físicas en otras regiones fuera del margen chileno, utilizando como motivación los resultados obtenidos por los autores, la actual investigación pretende caracterizar y obtener un modelo de la segmentación friccional para las principales zonas de subducción del planeta. Estas regiones corresponden a los márgenes Ecuador-Perú, México y Centro América, Cascadia, Alaska, Kamchatka, Japón, Sumatra-Andaman y Tonga, que son de particular interés debido a la importancia que representan en la sismicidad global y su relación con los terremotos grandes ocurridos. Se utilizó el método de análisis por componentes principales (PCA) aplicado a cada zona de subducción, nombradas antes, con los datos de anomalías de gravedad, bloque geodésico y fricción a partir de la cuña de Coulomb. Estos datos se obtienen a partir del procesamiento por separado de cada variable de entrada al PCA, esto a partir de variables geométricas propias de los márgenes utilizando la topografía y batimetría, series de tiempo de instrumentos GPS y anomalías de gravedad de aire libre de la región en particular. Luego, estos resultados previos se requieren en el PCA, además del número de perfiles perpendiculares a la fosa y la distancia entre ellos, así como el modo a estudiar.

Se usan estas tres variables geofísicas y geodésicas, ya que se obtiene información relevante de la zona de estudio. Las anomalías de gravedad nos entregan referencia acerca de la distribución de densidad de la zona de subducción, el bloqueo geodésico nos permite obtener información relevante al ciclo sísmico en la fase intersísmica debido a la acumulación de deformación y posible generación de eventos sísmicos importantes y, por último, la fricción en estas regiones nos brinda conocimiento de la interacción entre las placas tectónicas mostrando zonas con una mayor/menor posibilidad de deslizamiento por las asperezas y barreras que se pueden encontrar en dichas regiones, por consiguiente la posibilidad de la generación de terremotos. Entre los resultados preliminares que se puede destacar es la obtención de valores asociados a la fricción presente en todas las áreas de estudio, así como los valores de anomalías de gravedad necesarias para hacer uso del método.

Se espera que el método empleado permita destacar estos patrones espaciales y temporales que se buscan al emplear estas variables en el estudio, como en Molina et al. (2021), y obtener un modelo potencial que muestre la segmentación friccional para cada región y la relación de coincidencia que tenga con los largos de ruptura de los terremotos históricos ocurridos en esas zonas. Los resultados entregados por la investigación permitirán conocer más las regiones de estudio, la relación entre las características geológicas y los procesos físicos asociados a la actividad sísmica, que pueden ser relevantes en futuras investigaciones y al conocimiento asociado al riesgo sísmico en los márgenes convergentes.

Palabras Clave: Segmentación, Zonas de Subducción Global, Análisis por Componentes Principales

Referencias:

- Molina, D., Tassara, A., Abarca, R., Melnick, D., & Madella, A. (2021). Frictional segmentation of the Chilean megathrust from a multivariate analysis of geophysical, geological, and geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6), e2020JB020647.

Relajación viscoelástica posterior al terremoto 8.1Mw de Pisagua, Chile 2014

Roberto González Tapia¹⁻², Mahesh Shrivastava¹⁻², Gabriel González¹⁻², Daniel Cabezas¹⁻²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) CIGIDEN, Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, Av. Vicuña Mackenna 4860, La Florida, Macul, Santiago, Chile

El terremoto de Pisagua magnitud Mw 8.1 ocurrido el 1 de abril de 2014 al oeste de la costa de Pisagua (Iquique) y su principal réplica Mw 7.6 del 4 de abril rompen parcialmente un segmento históricamente acoplado del llamado gap sísmico ubicado en el norte de Chile. El presente trabajo realizado busca comprender los procesos de relajación de la fase postsísmica para este terremoto creando un modelo numérico. Para esto consideramos la naturaleza elástica de la corteza y el comportamiento viscoelástico del manto terrestre. El modelamiento numérico para la respuesta postsísmica de la tierra responde a naturaleza viscoelástica de la zona de ruptura. Utilizamos una serie de Green Functions que son calculadas mediante una transformada rápida de Fourier. Estas funciones consideran el modelamiento de un espacio no homogéneo, abarcan el área comprendida entre las latitudes 18°S - 21° S, las longitudes 69° W - 72° W y profundidades máximas de 90 km, consideran un dominio viscoelástico bajo los 60 km de profundidad y un deslizamiento previamente publicado (Shrivastava et al., 2019). Este modelo utiliza el perfil de un modelo creme brulée, con una placa elástica sobre un espacio viscoelástico. El modelo se ajusta a magnitudes de viscosidad entre 10^{17} Pa*s y 10^{19} Pa*s. El análisis de los datos continuos de posicionamiento otorgado por GPS es comparado con los datos entregados por modelos numéricos creados para ver su correlación, además también se calculan las series de tiempo para cada modelo y son comparadas con las series observadas por las estaciones GPS en superficie. La creación de estos modelos nos permite visualizar el comportamiento de la Tierra en profundidad. Una mejor comprensión de la deformación post sísmica de la corteza tras los grandes terremotos de subducción puede ayudar a entender mejor las propiedades reológicas del manto superior y el comportamiento de deslizamiento de la interfaz de subducción. Esta información es crucial para la planificación de la infraestructura y la seguridad pública, y puede ayudar a salvar vidas y reducir daños en caso de un desastre socio-natural.

Palabras Clave: Modelo numérico, Green Functions, Relajación viscoelástica.

Referencias:

- Shrivastava, M.N., González, G., Moreno, M. et al., 2019. Earthquake segmentation in northern Chile correlates with curved plate geometry. Sci Rep 9, 4403. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40282-6>.
- Rongjiang Wang, Francisco Lorenzo-Martín, Frank Roth, 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, Computers & Geosciences, Volume 32, Issue 4, Pages 527-541, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.08.006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300405001895>).
- Zhiping Hu, Yan Hu, Segun Steven Bodunde, 2021. Viscoelastic relaxation of the upper mantle and afterslip following the 2014 MW8.1 Iquique earthquake, Earthquake Research Advances, Volume 1, Issue 1, 2021, 100002, ISSN 2772-4670, <https://doi.org/10.1016/j.egrea.2021.100002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772467021000026>).

Cambios del acoplamiento intersísmico en el Norte de Chile durante las últimas dos décadas

Denisse Leal Chacana¹, Marcos Moreno²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Química

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería

El estudio de estimaciones de acoplamiento intersísmico es de gran importancia para poder identificar las zonas con mayor potencial de ocurrencia de sismos de magnitud considerable en el futuro. En este trabajo se realiza una estimación de acoplamiento en el norte de Chile (18°S-27.5°S), abarcando dos zonas consideradas como gaps sísmicos, donde se analiza la variación de acoplamiento antes y después del terremoto de Iquique 2014.

Esta región se caracteriza por presentar una deformación continental, no asociada al deslizamiento interplaca, la cual se ha interpretado como un movimiento de bloque rígido de aproximadamente 5-10 mm/yr (Métois et al., 2013, 2014). Otro método utilizado para explicar esta deformación es el de deformación regional (Yáñez-Cuadra et al., 2022), en el cual no es necesario asumir la existencia de la microplaca. Sin embargo, ambos métodos utilizan un modelo elástico. Debido a lo anterior, es que en este trabajo estimamos el acoplamiento intersísmico utilizando el método de deformación regional, pero considerando un modelo viscoelástico (Li et al., 2015). Los resultados muestran que la deformación no asociada al deslizamiento en el interfaz es menor al interpretado en otros trabajos (~4-5 mm/yr).

Los resultados de acoplamiento nos muestran que la región se encuentra principalmente en un periodo intersísmico, destacando las áreas entre Iquique-Antofagasta y alrededor de los 24°S, donde en ambas ventanas de tiempo el acoplamiento se mantiene alto. Por lo tanto, se concluye que es de gran importancia la incorporación de la deformación continental en las estimaciones de acoplamiento, sin embargo, esta debe considerar las deformaciones viscoelásticas para obtener resultados robustos. Además, es necesario seguir trabajando en mejorar los modelos viscoelásticos incluyendo variaciones reológicas, con el fin de obtener resultados más realistas.

Palabras Clave: intersísmico, Zonas de subducción, Estimación de acoplamiento.

Financiamiento: Este estudio contó con el financiamiento del Proyecto Anillo Precursor.

Referencias:

- Li, S., Moreno, M., Bedford, J., Rosenau, M., & Oncken, O. (2015). Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru North Chile subduction - zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(6), 4522-4538.
- Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., ... & Ortega, I. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3), 1283-1294.
- Métois, M., Vigny, C., Socquet, A., Delorme, A., Morvan, S., Ortega, I., & Valderas-Bermejo, C. M. (2014). GPS-derived interseismic coupling on the subduction and seismic hazards in the Atacama region, Chile. *Geophysical Journal International*, 196(2), 644-655.
- Yáñez-Cuadra, V., Ortega-Culaciati, F., Moreno, M., Tassara, A., Krumm-Nualart, N., Ruiz, J., ... & Benavente, R. (2022). Interplate Coupling and Seismic Potential in the Atacama Seismic Gap (Chile): Dismissing a Rigid Andean Sliver. *Geophysical Research Letters*, 49(11), e2022GL098257.

Estudio sistemático del registro del terremoto de Valdivia 1960 en anillos de *Fitzroya cupressoides* en 9 sitios

Joaquín Morales Molina¹, Álvaro Gonzáles Reyes¹⁻²⁻³⁻⁴, Daniel Melnick d'Etigny¹⁻⁵⁻⁶, Antonio Lara Aguilar²⁻⁷⁻⁸

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile.

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Conservación, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Valdivia, Chile

(3) Universidad Austral de Chile, Centro de Humedales Río Cruces CEHUM, Valdivia, Chile

(4) Centro de Investigación: Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes - IDEAL

(5) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, TAQUACH, Valdivia, Chile

(6) Universidad Austral de Chile, Núcleo Milenio CYCLO, El ciclo sísmico a lo largo de zonas de subducción, Valdivia, Chile

(7) Center for Climate and Resilience Research (CR), Santiago, Chile

(8) Fundación Centro de los Bosques Nativos FORECOS, Valdivia, Chile

Se han hecho grandes esfuerzos por entender la periodicidad de los eventos sísmicos en todo el mundo y, en consecuencia, buscar nuevas formas de registro sísmológico. Una de estas técnicas es la dendrosismología, que consiste en el estudio y datación de terremotos mediante la aplicación de técnicas y análisis dendrocronológicos de los anillos de crecimiento de los árboles (Jacoby, 1997). Esta clase de estudios utiliza distintas características anatómicas de los árboles para encontrar ciertos tipos de registros indirectos de un evento sísmico de tipo mecano-físico, y a través de cambios en las tasas de crecimiento, especialmente del ancho de los anillos. La respuesta suele variar por árbol y cambios del entorno en el que se encuentra cada individuo de la especie. En Chile, se han realizado trabajos dendrocronológicos utilizando múltiples especies, resaltando los estudios empleando la especie de alerce *Fitzroya cupressoides*, conífera siempreverde endémica del sur de Chile y Argentina que se ubica entre las latitudes 39°50' a 43°35'S (Donoso, 1993; Hechenleitner et al., 2005). Esta conífera puede alcanzar una edad superior a los 3600 años (Lara y Villalba, 1993) y es la más longeva del hemisferio sur, siendo esta última característica la que permite hacer una evaluación cronológica de los terremotos a una escala de miles de años, esto, debido a la resolución anual del ancho de anillos. Los grosores relativos de anillos por individuo, denominados Índice de Ancho de Anillos (*Ring Width Index RWI*), representan un crecimiento anual respecto al diámetro total del árbol. Las señales de eventos tectónicos utilizando series de ancho de anillos permiten tener una mayor precisión en términos datación y con respecto a otras metodologías debido al crecimiento anual que marcan los anillos en los árboles, por ejemplo; dataciones radiométricas. Esta información anual contiene eventos que pueden afectar de manera positiva o negativa el crecimiento del árbol, como el clima, cantidad de agua disponible, tasa de radiación directa y difusa, entre otras.

Para comprobar que es posible observar un registro sísmico en los anillos de árboles de Alerce, y por ende buscar estos registros en edades anteriores al registro histórico, se ha escogido el evento sísmico más grande registrado instrumentalmente, el terremoto de Valdivia 1960 (Cifuentes, 1989). Este evento generó una ruptura de más de 200 km de ancho y aproximadamente 1000 km de largo entre las latitudes 37° y 48°S (Plafker & Savage, 1970). Se adaptaron distintas funciones a cronologías de diferentes sitios, y también a series de ancho de anillos utilizando ventanas de tiempo anuales a decadales centradas en 1960. Los resultados se integraron con las condiciones geológicas, geomorfológicas, edáficas y climáticas de cada sitio para determinar los factores favorables para registrar terremotos en anillos de árboles.

Los sitios fueron agrupados en 2 zonas de estudio. La Cordillera de la costa, que cuenta con 3 sitios (Isla del Rey, Cordillera Pelada y Chiloé), y con 15, 28 y 66 series de anillos respectivamente. La zona Cordillera Norpatagónica, con 6 sitios ubicados desde Puerto Montt hasta Huinay y 116 series en total.

Esta investigación es un trabajo en curso que forma parte de los requisitos para optar al Título de Geólogo en la Universidad Austral de Chile.

Palabras Clave: Terremoto 1960, Dendrosismología, *Fitzroya cupressoides*.

Financiamiento: Esta investigación es financiada por el Núcleo Milenio "CYCLO: The Seismic Cycle Along Subduction Zones".

Referencias:

- Cifuentes, I., 1989. The 1960 Chilean earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 94, 665-675.
- Donoso, C., Sandoval, V., Grez, R., Rodríguez, J., 1993. Dynamics of *Fitzroya cupressoides* forests in southern Chile. *Journal of Vegetation Science*, 4, 303.
- Hechenleitner, P., Gardner, M., Philip, T., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P., Martínez, C., 2005. Plantas amenazadas del centro-sur de Chile: distribución, conservación y propagación. Valdivia, Chile.
- Jacoby, G.C., 1997. Application of tree ring analysis to paleoseismology. *Reviews of Geophysics*, 35, 109-124.
- Lara, A., & Villalba, R., 1993. A 3620-Year Temperature Record from *Fitzroya cupressoides* Tree Rings in Southern South America. *Science*, 260(5111), 1104-1106.
- Lomnitz, C., 2004. Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters* 75, 368-378.
- Plafker, G., Savage, J., 1970. Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 1001-103.

Registro geológico de megainundaciones por represamiento de ríos de deslizamiento tras el terremoto de Chile de 1960 y sus predecesores en Valdivia

Adriana Rivera Murton¹, Mario Pino¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Isla Teja, Valdivia, Chile

A raíz del terremoto ocurrido el 22 de mayo de 1960 ($M_w=9.5$), cuyo epicentro ocurrió 200 km al norte de esa ciudad, cerca de Lumaco (Cifuentes, 1989) se produjeron 3 grandes derrumbes que represaron el cauce superior del Río San Pedro a 65 kilómetros al Este de la ciudad recién mencionada. Ya se tenía conocimiento de un gran sismo ocurrido en 1575 en la zona y el posterior desborde del lago Riñihue; Hernández (1960) menciona que *sic* “cada cierto tiempo (1575, 1835, 1922, 1960), el inmenso cerro Tralcán, que se levanta a 1.000 m sobre la desembocadura del Riñihue, en el San Pedro, desploma parte de sus laderas arcillosas que ciegan el rebalse con diques naturales que los hidráulicos llaman tacos”.

Así, en 1960 la altura del lago Riñihue aumentó durante dos meses, elevando su nivel en más de 25 m. La descarga semi-controlada del agua acumulada (3.000 m^3) ocurrió a través de canales contruidos artificialmente y provocó la inundación de todos los cauces medios y bajos de los ríos Calle-Calle y Valdivia, y por ende también afectó a la ciudad homónima (Davis y Karzulovic, 1961; Watanabe y Karzulovic, 1960). En la ciudad se estimó que la inundación alcanzó una altura de entre 1,6 y 2,4 m sobre el actual nivel medio del mar (Hernández-Ojeda, 2011). Esto la cataloga como la mayor inundación en la ciudad de Valdivia recopilada con datos de la DGA por Rojas (2007) en el periodo de 1899 hasta 2006.

El objetivo de este estudio es investigar la evidencia geomorfológica, estratigráfica y sedimentológica de la inundación de 1960 en Valdivia, también conocida como el “Riñihuazo”. Los métodos a utilizar incluyen análisis de topografía LiDAR, toma de testigos en las áreas de inundación en las localidades de Santa Elvira, Quitacalzón, Manantiales y Huelhellhue, además de análisis para caracterizar y determinar la proveniencia de los sedimentos.

Esta investigación es un trabajo en curso que forma parte de los requisitos para optar al Título de pregrado en Geología en la Universidad Austral de Chile.

Palabras Clave: Terremoto 1960, Riñihuazo, Inundación lacustre.

Financiamiento: Esta investigación es financiada por el Núcleo Milenio “CYCLO: The Seismic Cycle Along Subduction Zones”.

Referencias:

- Cifuentes, I., 1989. “The 1960 Chilean Earthquake”. Journal of Geophysical Research, vol. 94, No. B1, pág. 665-680.
- Davis, S., Karzulovic Kokot, J. 1961. Deslizamientos en el valle del río San Pedro Provincia de Valdivia, Chile. Anales De La Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, 18(18), Pág. 47–108.
- Hernández Parker. 1960. “Catástrofe en el Paraíso: Reportaje al sur de Chile por Luis Hernández Parker y 61 fotografías del mayor sismo de la historia”, Editorial del Pacífico S.A., (p. 73-74). Santiago, Chile.
- Hernández-Ojeda, J. 2011. 1960: Memorias de un desastre (1. ed). Arte Sonoro Austral Ediciones.
- Rojas, C. 2007. Eventos naturales extremos durante el siglo XX en la provincia de Valdivia, sur de Chile. Estudio presentado en el XI Encuentro de Geógrafos de América Latina. Bogotá, Colombia 26 al 30 de marzo.
- Watanabe, T., Karzulovic Kokot, J. 1960. Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile. Anales De La Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, 17(17), Pág. 39–87.

Comparación de parámetros cinemáticos de ruptura para dos terremotos ($M_w \sim 7.1$) ocurridos el 2013 y 2018 en la costa sur de Perú

Iván Rojas-Churkovic¹, Javier Ruiz¹, Francisco Ortega-Culaciatti¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Avda. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

Dos terremotos $M_w \sim 7.1$ ocurrieron en la placa oceánica de Nazca frente a la costa sur de Perú, en los años 2013 y 2018, con epicentros cercanos (~ 36 km). Ambos han sido estudiados de forma acotada hasta la fecha, y según distintas agencias sismológicas que reportan sus hipocentros, las rupturas se habrían producido a una profundidad de 30-45 km. Dicha profundidad es mayor que la interfaz entre las placas de Nazca y Sudamericana propuestas por algunos modelos (15-20 km bajo la interfaz definida por estudios sísmicos y gravimétricos), por lo que se trataría de terremotos intraplaca. El mecanismo de ambos eventos es representativo de fallamiento inverso.

El primer evento ocurrió el 25 de septiembre de 2013, (15.90°S , 74.60°W) a las 16:42:43 UTC, $M_w=7.1$ y profundidad de 40 km (NEIC, 2013), tuvo más de 20 réplicas durante las primeras 72 hrs después del evento principal, y produjo un tsunami con amplitudes de 10 a 30 cm (Tavera et al., 2013). El segundo evento ocurrió el 14 de enero de 2018 (15.75°S , 74.70°W), a las 9:18:45 UTC, $M_w=7.1$ con foco a 39 km de profundidad (NEIC, 2018), y tuvo más de 35 réplicas durante las primeras 72 hrs después del evento principal. Asimismo, generó un tsunami instrumental, con amplitudes registradas de hasta 20 cm. Ambos terremotos muestran características que sugieren ser de terremotos intraplaca: altas aceleraciones en el suelo (pga) en las áreas más afectadas, debido a una alta caída de esfuerzos relacionada con (1) un área de ruptura acotada (a diferencia de los interplaca) y (2) un deslizamiento más extenso (de escala métrica).

Dada la magnitud ≥ 7.0 de ambos eventos, fue posible estudiar la finitud de la fuente para ambos terremotos (2013 y 2018) a través de una inversión cinemática de la ruptura sísmica. Para cada terremoto, se utilizaron registros de banda ancha de más de 120 estaciones pertenecientes a la red sísmológica global, con distancia epicentral Δ entre 30° y 90° .

La inversión de deslizamiento fue llevada a cabo a través del método *multi-time window*, donde el historial espacio-temporal es descrito por la combinación lineal de parámetros del modelo. Esto consiste en establecer un modelo lineal, del tipo $\mathbf{G} \cdot \mathbf{m} = \mathbf{d}$, en una grilla de planos de falla discretizados en subfallas. Se utilizaron regularizaciones espaciales y temporales para estabilizar la inversión, y se obtuvieron soluciones mediante mínimos cuadrados amortiguados. Dado un set de parámetros geométricos de la falla (ubicación del hipocentro, orientación del plano de falla (rumbo y manteo), y dirección de deslizamiento (*rake*)); ubicaciones de estaciones; parámetros físicos (velocidad de ruptura, *rise-time*) y un modelo de velocidades 1D; se calculó un conjunto de Funciones de Green para 2 ángulos diferentes (el promedio $\pm 45^\circ$) y generó la matriz $\mathbf{G}$, mientras que el vector $\mathbf{m}$ son los deslizamientos a lo largo de cada subfalla del plano. Los datos de sismogramas observados fueron concatenados en el vector.

Dentro de los resultados preliminares, se incluye una magnitud $M_w \sim 7.0$ para ambos eventos. Para el evento de 2018, los modelos de ruptura iniciales muestran un valor de deslizamiento máximo de ~ 3 m dentro del plano de falla asumido, con vector de deslizamiento promedio en dirección de cabalgamiento puro (sin deslizamiento en el rumbo), una duración en la fuente de ~ 23 s, y una máxima tasa de momento de $\sim 8 \cdot 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Las diferencias mostradas entre ambos eventos incluyen que el primero de ellos tuvo la mayoría de su deslizamiento concentrado en una región lejana al hipocentro, mientras que el segundo, muestra una amplitud máxima en las inmediaciones del hipocentro.

Palabras Clave: teleseismic inversion, Nazca subduction, southern Perú, Inverse Theory, finite source.

Financiamiento: Proyectos Fondecyt 1200679 y 1231684.

Correlación entre la anomalía residual y distribución de densidades, en la región de antearco. Comparación entre los 35°00'-36°00'S y los 40°00'-40°30'S

Sebastián Aguilaf Carmona¹, Daniel Morales Valderrama¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geofísica, Santa María 0104, Santiago, Chile

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de la obtención de la anomalía residual de dos regiones del antearco, una zona norte (sector Constitución) y otra sur (sector La Unión), y su correlación con la distribución de densidades de las unidades geológicas de cada sector. En el caso de Constitución se obtiene una anomalía residual, utilizando una metodología convencional, que consiste en restar la tendencia regional a la anomalía de Bouguer, mediante un polinomio de grado 1 o 2, y cuyo resultado muestra una buena correlación con la geología de superficie. Mientras que, en el caso de La Unión, siguiendo esta misma metodología, no se observa una correlación significativa; la cual solo mejora al restar la tendencia regional mediante una aproximación local por el método de mínima curvatura. Por otra parte, la técnica de procesamiento TDR (*Tilt derivative*) que permite destacar lineamientos gravimétricos, y que rescata la señal tanto de fuentes someras como profundas, exhibe una buena correlación con la geología estructural de ambas regiones.

Introducción

El método gravimétrico permite ver las variaciones en el campo gravitatorio producidas por una diferencia de densidad de las diferentes entidades que conforman tanto la corteza como el manto litosférico. En específico, la anomalía de Bouguer de escala regional muestra variaciones de niveles profundos a someros, que involucran la composición de la corteza, la losa subductada y el manto litosférico de antearco. Mientras que la anomalía residual, la cual se obtiene tras remover la señal gravimétrica regional, muestra variaciones en la densidad de cuerpos ubicados a profundidades intermedias a someras en la corteza y, por lo tanto, usualmente se la relaciona con la geología de superficie.

Estudios previamente realizados a lo largo del margen continental entre los 36°S y 42°S (Bishop *et al.*, 2019; Tasarova *et al.*, 2007) basados en gravimetría junto a otros métodos geofísicos, han propuesto una segmentación en la configuración de antearco dividiendo dicha región en tres segmentos principales. Una porción septentrional entre los 36°S-39°S caracterizado por una anomalía gravimétrica positiva emplazada a lo largo de todo el margen continental, un segmento intermedio entre los 39°S-40°S, caracterizado por un bajo gravimétrico, y una porción meridional entre los 40°S-42°S con un trend de anomalías positivas ubicado más al este, sobre la porción occidental de la depresión central.

En este trabajo se analizan y comparan las anomalías gravimétricas, densidades y estructuras de las unidades geológicas de dos regiones del borde continental. Un sector norte entre los 35°S-36°S (sector Constitución) y un sector sur entre los 40°S-40°30'S (sector La Unión).

Anomalía residual y distribución de densidades

Sector Constitución (71°45'-73°15'O/35°00'-36°00'S)

En el área de Constitución se realizó un total de 1.291 mediciones gravimétricas y se midió densidad en 59 muestras de roca de las distintas unidades geológicas. El gradiente observado en la anomalía de Bouguer (Fig. 1a) obedece a un patrón regional presente a lo largo de toda la línea de costa chilena, el que se explica principalmente por el contraste de densidad entre la corteza continental, la placa oceánica subductada y el manto litosférico de antearco. Hacia la línea de costa la placa oceánica es más somera junto con el manto litosférico de antearco, mientras que progresivamente hacia el este, la placa oceánica subduce a mayor profundidad, el moho es más profundo, y la corteza continental de antearco aumenta su espesor (Tassara *et al.*, 2006).

Por otra parte, la anomalía residual difiere notoriamente de la anomalía de Bouguer (Fig. 1a y 1b), pero exhibe un patrón de anomalías similar a la distribución de densidad de las unidades geológicas (Fig. 1b y 1c) estableciendo una relación de primer orden entre estas. Algunas variaciones locales en la anomalía residual pueden explicarse por factores secundarios tales como la compactación, alteración hidrotermal, meteórica y/o la presencia de agua subterránea (Morales *et al.*, 2021). En este caso, la anomalía residual se obtuvo restando la tendencia regional a través de un polinomio de segundo grado a la anomalía de Bouguer. Las diferencias en la anomalía residual obtenida, ya sea aplicando un polinomio de primer o segundo grado, no fueron significativas.

Sector La Unión (73°00'-73°47'O/40°00'-40°30'S)

En el sector de la Unión se realizó un total de 465 mediciones gravimétricas y se midió la densidad de 103 muestras de roca de las distintas unidades geológicas del área. La anomalía de Bouguer exhibe un trend de altos gravimétricos que, a diferencia de Constitución, se encuentra desplazado al este de la línea de costa ubicándose sobre la porción occidental de la depresión central (Fig. 2a). Dicho desplazamiento de la anomalía de Bouguer ha sido modelado e interpretado previamente como resultado de un cambio en la configuración del antearco (Tasarova *et al.*, 2007).

Posteriormente, en este sector se obtuvo la anomalía residual de dos formas, una similar a la de Constitución, restando la tendencia regional mediante un polinomio de segundo grado (Fig. 2b) y otra mediante aproximaciones locales de la tendencia regional, utilizando el método de mínima curvatura (Fig. 2c).

FIGURA 1

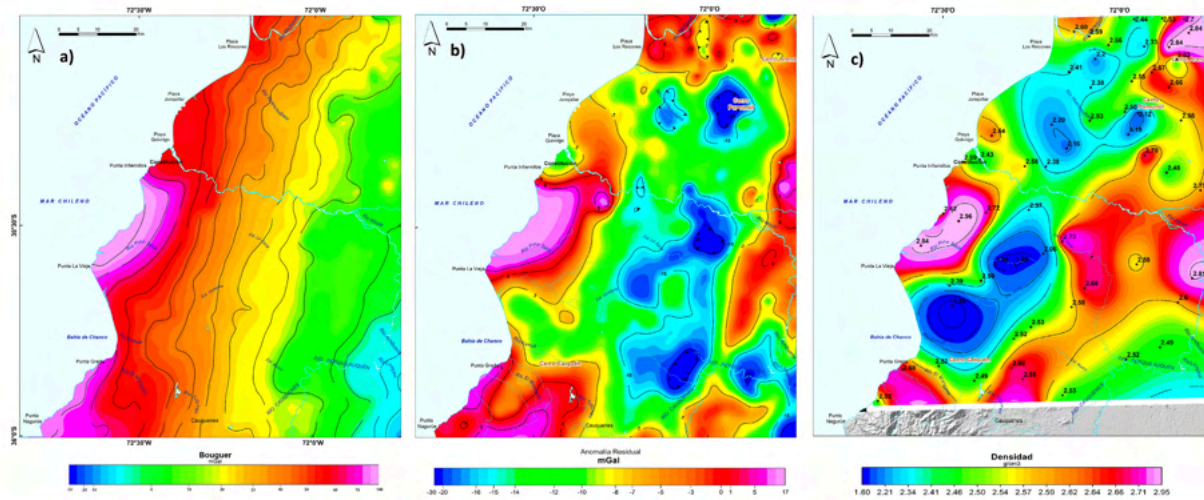


FIGURA 2.

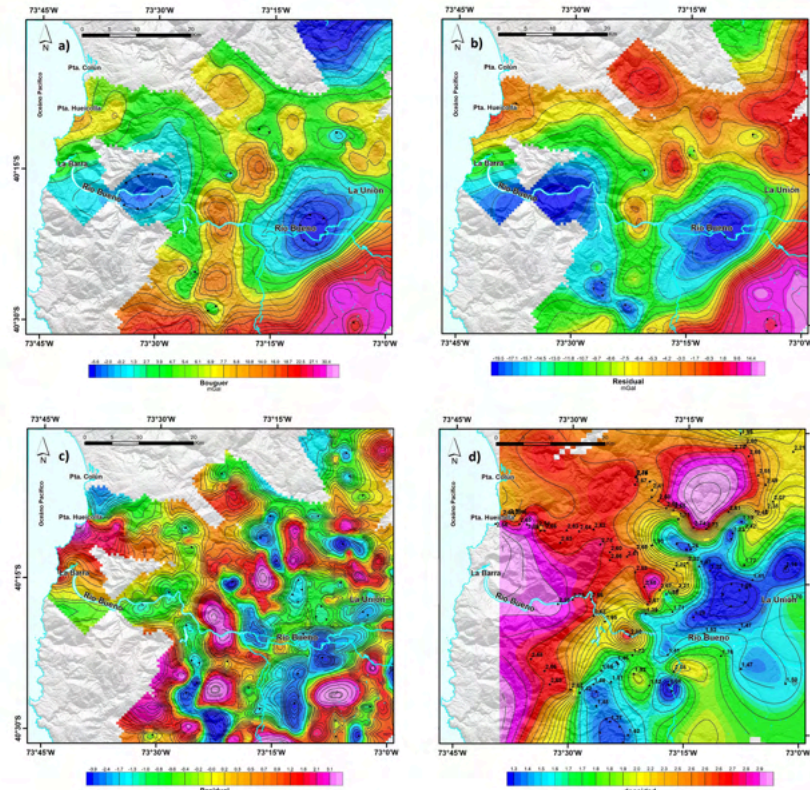


Figura 1. Sector de Constitución ($71^{\circ}45'-73^{\circ}15'0''/35^{\circ}00'-36^{\circ}00'S$). **a)** Anomalia de Bouguer. **b)** Anomalia residual (obtenida restando el trend regional mediante un polinomio de segundo orden). **c)** Interpolación de densidad de muestras de las unidades geológicas (valores de densidad ploteados).

Figura 2. Sector de La Unión ($73^{\circ}00'-73^{\circ}47'0''/40^{\circ}00'-40^{\circ}30'S$). **a)** Anomalia de Bouguer. **b)** Anomalia residual (obtenida restando el trend regional mediante un polinomio de segundo orden). **c)** Anomalia residual (obtenida restando el tren regional por método de mínima curvatura). **d)** Interpolación de densidad de muestras de las unidades geológicas (valores de densidad ploteados).

En el primer caso la anomalía residual es similar a la anomalía de Bouguer (Fig. 2a y 2b) pero distinta de la distribución de densidades (Fig. 2b y 2d). Mientras que, en el segundo caso, por el método de mínima curvatura, se observa una correlación algo mejor entre la anomalía residual y la distribución de densidades de las unidades geológicas (Fig. 2c y 2d).

El método de mínima curvatura permite en este caso, crear una grilla de valores de la tendencia regional (Mickus et al., 1991), estimados sobre datos gravimétricos distribuidos de forma no uniforme en un área. Es directo constatar esta diferencia en la distribución de la anomalía de Bouguer entre Constitución, que exhibe un gradiente regional uniforme (Fig. 1a), y La Unión donde presenta una distribución de anomalías más aleatoria (Fig. 2a).

Derivada Tilt (TDR)-Geología Estructural

La derivada Tilt (TDR), consiste en una técnica que aplica una función geométrica tanto de la derivada vertical como horizontal de un campo potencial (Stewart y Miller, 2018). El resultado permite destacar lineamientos gravimétricos detectando zonas de fallas donde el desplazamiento juxtapone unidades de rocas con contraste de densidad (Morales et al., 2021).

Tanto en el caso de Constitución como en el de La Unión, el conjunto de lineamientos gravimétricos obtenidos a partir de esta técnica muestra una buena correlación con las estructuras regionales principales de ambas áreas. Esto tendría relación a que dicha técnica responde tanto a fuentes someras como profundas, rescatando especialmente la señal débil de fuentes profundas frente a señales fuertes de cuerpos más someros (Miller y Singh, 1994).

En el caso de Constitución, la TDR destaca lineamientos de orientación NNE-SSO, NO-SE y N-S, los cuales coinciden con sistemas de fallas regionales de orientación NNE-SSO (Sistema de Fallas Maule) que involucran algunas fallas de rumbo en el contacto entre intrusivos triásico-jurásicos y el basamento metamórfico carbonífero-pérmico (e.g. Falla Estero doña Toribia). Mientras que los lineamientos NO-SE coinciden con fallas asociadas a la depositación de unidades sedimentarias marinas del Cretácico Superior dentro del basamento metamórfico (e.g. Falla Carranza) (Jorquera et al., en preparación).

Por otra parte, en el caso de La Unión se observaron tres grupos de lineamientos principales de orientación: NO-SE, N-S y NE-SO. Los lineamientos NO-SE se ubican sobre rocas del basamento metamórfico y se relacionan con estructuras regionales profundas de la corteza generadas posiblemente en el ciclo pre-andino durante el Pérmico Inferior-Triásico Medio (Carrasco et al., en preparación). Estos lineamientos a su vez pierden continuidad hacia el este, siendo cortados por lineamientos de orientación N-S y NE-SO. Estos lineamientos más orientales, usualmente se ubican en la zona de contacto entre el basamento metamórfico y unidades sedimentarias, y se encuentran asociados a depocentros controlados por fallas normales, lo que habría dado paso a la depositación de unidades sedimentarias miocenas (Carrasco et al., en preparación).

Discusión y conclusión

La metodología para obtener una anomalía residual que se correlacione con las densidades de las unidades geológicas, difiere notoriamente entre el sector de Constitución y La Unión. En el caso de Constitución, se observa una correlación de primer orden entre la distribución de densidades y la anomalía residual, la que se obtiene restando la tendencia regional, ya sea a través de un polinomio de primer o segundo grado.

La falta de correlación en el caso de La Unión aplicando este método, podría deberse a efectos regionales de gran escala, tales como diferencias en la configuración de antearco o bien a la existencia de cuerpos en la corteza media-inferior de altas densidades que contrastan con las unidades someras menos densas. En efecto, en el caso de La Unión, una mejor correlación fue obtenida al restar la tendencia regional mediante una aproximación local de mínima curvatura, método que permite estimar la tendencia regional en zonas con una distribución de anomalías gravimétricas no uniforme. Lo anterior, supondría considerar diferentes metodologías en la obtención de la anomalía residual para fines interpretativos, en áreas con escasa información geológica a lo largo de la región de antearco, especialmente al sur de los 39°S.

A pesar del contraste de correlación entre la anomalía residual y la distribución de densidades, entre ambos sectores; la técnica de procesamiento de la Derivada Tilt (TDR), utilizada para destacar lineamientos gravimétricos, muestra en ambos casos buenas correlaciones con la geología estructural de cada sector, lo que representa una ventaja al momento de evaluar estructuras tanto someras como profundas de la corteza.

Palabras Clave: Anomalía residual, antearco, densidad, anomalía de Bouguer, derivada Tilt (TDR).

Financiamiento: Esta publicación está auspiciada por la Subdirección Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería, y se realizó en el marco del estudio: gravimetría de la carta geológica La Unión.

Referencias:

- Bishop, B.T.; Beck, S.L.; Zandt, G. 2019. Segmentation in continental forearcs: Links between large-scale overriding plate structure and seismogenic behavior associated with the 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake. *Tectonophysics* 767: 3-4.
- Carrasco, F.; Duhart, P.; Mella, M.; Quiroz, D.; Venegas, C.; Ramírez, P. En preparación. Geología de las áreas La Unión-Quilacahuín y Río Colún, regiones de Los Ríos y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica.
- Jorquera, R.; Domagala, J.; Villa, V.; Astudillo, N. En preparación. Carta Geológica Pichibello. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica.
- Mickus, K. L.; Aiken, C. L. V.; Kennedy, W. D. 1991. Regional-residual gravity anomaly separation using the minimum-curvature technique. *Geophysics* 56: 279-283.
- Miller, H.G.; Singh, V. 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics* 32 (2-3): 213-217.
- Morales, D.; Aguilera, S.; Cáceres, D. 2021. Gravimetría de la Hoja Constitución, región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geofísica 115: 44 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Stewart, I.C.F.; Miller, D.T. 2018. Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics* 159: 553-563.
- Tašárová, Z.A. 2007. Towards understanding the lithospheric structure of the southern Chilean subduction zone (36° S-42° S) and its role in the gravity field. *Geophysical Journal International* 170 (3): 995-1014.
- Tassara, A.; Götze, H.J.; Schmidt, S.; Hackney, R. 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 111 (B9).

Geometría y actividad de fallas, asociado al desarrollo de la subducción y procesos de transferencia de masa en el margen centro sur de Chile

Ximena Contardo-Berrios¹, Cristian Rodrigo-Ramírez¹

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

Las zonas de subducción evidencian variabilidad y complejidad estructural incluso entre segmentos contiguos, determinando una evolución estructural heterogénea, reflejada en su carácter sísmico.

La evolución tectónica del margen convergente chileno está controlada tanto por las características de la placa de Nazca, como por los procesos de transferencia de masa hacia la fosa. Parámetros asociados a la placa subductante, como la tasa de convergencia y oblicuidad; edad, temperatura, grado de acoplamiento y presencia de estructuras o rugosidades, determinan un rol fundamental en los procesos de subducción. Sin embargo, el parámetro de mayor contraste a lo largo del margen chileno está definido por la variabilidad en el volumen y desarrollo mecánico de los sedimentos que entran en la fosa, indicándose como un factor de primer orden del sistema acrecionario.

Significativas diferencias a lo largo y ancho del margen centro sur de Chile, evidencian variaciones en el grado de erosión-acreción y alzamiento del prisma a diferentes latitudes del margen. Estas diferencias inciden directamente en la geometría de fallas y arquitectura de las cuencas asociadas. El relleno de las cuencas, de edad predominantemente Pleistoceno medio a Holoceno, evidencia al menos tres secuencias sísmicas bien definidas y de amplia distribución, identificadas como basal pre-cinemática, intermedia sin-cinemática y unidad superior post-cinemática. Las estimaciones de edad obtenidas para los límites de estas unidades (que corresponden a discordancias angulares y/o de erosión) evidencian ciclos de primer rango de ~100 ka, los cuales pueden ser asociados a fluctuaciones climáticas globales. El análisis de la depositación y deformación de las unidades, sugiere episodios alternantes de extensión, relativa estabilidad y compresión (y/o transpresión). Estructuras en flor evidencian principalmente estructuras transpresionales paralelas al margen, asociadas a inversión tectónica y alzamiento diferencial del prisma de acreción.

Mediante simulaciones análogas se ha logrado experimentar e identificar mecanismos que permiten generar geometrías y arquitectura consistente con la observada en la sísmica de alta resolución. Se consideró en la modelación, la variabilidad de volumen y características mecánicas del sedimento, consistente con las variaciones de aportes a la fosa durante períodos glaciares e interglaciares. Se incorporaron alternancias de alta y baja fricción en la interfaz de la placa, variando la longitud y periodicidad de los segmentos, lo anterior determinó alternancias de acreciones basal y frontal. Adicionalmente, se observó que la interfase o transición entre una zona de alta y baja fricción, ofrece un mecanismo capaz de desarrollar estructuras subverticales, con reactivación, consistente con las fallas de borde de cuenca observadas en el registro sísmico. También se observó que un segmento largo de baja fricción basal, seguido de un segmento largo de alta fricción basal, facilita la subducción de una extensa capa de arena sin ninguna deformación (underplating). La subducción de este segmento sería consistente con un canal de subducción, una característica de la zona de convergencia, identificada a partir de imágenes sísmicas profundas. La modelación evidencia que la transferencia de masa es un mecanismo de reactivación de fallas hacia el continente, el sucesivo avance de la capa de sedimentos en la interfaz de la placa, deforma la cuña acrecionaria mediante la reactivación y propagación de fallas hacia el continente.

Nuevas interrogantes surgen respecto de otros mecanismos que localmente aportan material de alta fricción a la zona de subducción, rugosidades como los montes submarinos, de grandes dimensiones (por ej., la Dorsal de Juan Fernández ~32°-33°S), enfrentados a una fosa con alto volumen de sedimentos. Donde se observa un borde acotado de fallamiento inverso y predominio de mecanismo de erosión tectónica y transferencia de masa a lo largo de la zona de subducción.

Palabras Clave: transferencia de masa, subducción, dinámica del margen, geometría de fallas.

Referencias:

- Bangs, N., Cande, S., 1997. Episodic development of a convergent margin inferred from structures and processes along the southern Chile margin. *Tectonics* 16, 489–503.
- Contardo, X., Kukowski, N., Cembrano, J., 2011. Material transfer and its influence on the formation of slope basins along the South Central Chilean convergent margin: Insights from scaled sandbox experiments. [doi:10.1016/j.tecto.2011.09.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.016). *Tectonophysics* – Elsevier. Vol. 513, 20-36.
- Contardo, X., Cembrano, J., Jensen, A., Díaz-Naveas, J., 2008. Tectono-sedimentary evolution of marine slope basins in the Chilean forearc (33°30'–36°50'S): Insights into their link with the subduction process *Tectonophysics*, [doi:10.1016/j.tecto.2007.12.014](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.12.014).
- Larroque, C., Calassou, S., Malavieille, J., Chanier, F., 1995. Experimental modelling of forearc basin development during accretionary wedge growth. *Basin Research* 7, 255-268. Laursen, J., Scholl, D., von Huene, R. 2002.
- Neotectonic deformation of the central Chile margin deepwater forearc basin formation in response to hot spot ridge and seamount subduction. *Tectonics* 21(3): [doi:10.1029/2001TC901023](https://doi.org/10.1029/2001TC901023).
- Laursen, J., Normark, W., 2002. Late Quaternary evolution of the San Antonio Submarine Canyon in the central Chile forearc (~ 33°S). *Mar. Geol.* 188, 365-390.
- Laursen, J., Normark, W., 2003. Impact of structural and autocyclic basin-floor topography on the depositional evolution of the deep-water Valparaíso forearc basin, central Chile. *Basin Research* 15, 201–226.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O., 2003. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *J Struct Geol* 25:1691–1711.
- Rauch, K., 2005. Cyclicity of Peru–Chile trench sediments between 36°S and 38°S: a footprint of paleoclimatic variations? *Geophys Res Lett* 32: [doi:10.1029/2004GL022196](https://doi.org/10.1029/2004GL022196).

Influencia de parámetros geodinámicos y morfo-estructurales del fondo oceánico en el ángulo de subducción a escala global: análisis mediante Inteligencia Artificial

Lucas Crisosto Urrutia¹, Felipe Quiero Silva², Andrés Tassara Oddo³

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Concepción, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Departamento de Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Exactas, Concepción, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

Con el objetivo de evaluar el impacto de parámetros geodinámicos y morfoestructurales del fondo oceánico en el ángulo de subducción, se ha direccionado este trabajo en las principales zonas de subducción a escala global. Para 157 transectas perpendiculares a la fosa distribuidas a lo largo de los principales sistemas de subducción en el planeta se determinan ángulos y parámetros geodinámicos incluyendo naturaleza y velocidad de la placa cabalgante, velocidad de la placa subductante, edad de la placa, rugosidad del fondo oceánico, y la distancia de cada transecta al borde de placa más cercano dentro del sistema de subducción. Diferentes autores han considerado diferentes parámetros y factores que describirían de mejor forma los elementos que controlan el ángulo de subducción, más que la edad de la placa por sí sola. A pesar de obtener resultados interesantes, principalmente a partir de correlaciones lineales y multivariantes, se sugiere también en la literatura el uso de algoritmos de Machine Learning para el entendimiento de procesos no lineales especialmente para problemas complejos caracterizados por una interdependencia de variables. Es por esto que, este trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia combinada de diferentes parámetros de subducción, tanto morfológicos como cinemáticos, en el buzamiento del slab a escala global. Para este fin dos algoritmos de Machine Learning supervisado son implementados: XGBoost y SHAP, donde a partir de los resultados obtenidos es posible determinar que, (1) sea continental u oceánica, la velocidad de la placa cabalgante es el parámetro principal que controla el buzamiento de la placa. En límites de placa oceánica-continental una mayor velocidad de la placa superior tiende a formar ángulos menores debido a su mayor grosor y una mayor succión hidrodinámica en el flujo de esquina asociada a esta. Por el contrario, en límites de placa oceánica-oceánica altas velocidades de la placa cabalgante tienden a formar losas más empinadas y viceversa, asociándose una mayor velocidad con un favorecimiento de roll-back en sistemas de subducción con extensión en el tras-arco. (2) Para la velocidad de la placa subductante, la relación encontrada en los arcos continentales es la misma que la velocidad de la placa superior apoyando la idea de que a mayor velocidad de ambas repercute en una mayor succión hidrodinámica que tendería a levantar el slab. En las zonas donde la placa superior es oceánica, debajo de la zona sismogénica la relación tiende a ser directa, pero mostrando un bajo impacto. (3) La subducción de dorsales asísmicas asociadas a altos valores de rugosidad del fondo oceánico, sólo producirían un efecto de boyancia en los límites de placa oceánica-continental sugiriendo también la influencia adicional de otros factores por considerar.

Palabras Clave: Ángulo de subducción, Machine Learning, Geodinámica, Fuerza de succión, Fuerza de anclaje.

Estructura litosférica en el flat-slab pampeano determinada mediante inversión de funciones receptoras y curvas de dispersión sobre la Sierra de San Luis

Marina Escobares¹⁻², Silvana Spagnotto¹⁻²⁻³, Augusto Morosini¹⁻², Marcos Ariel Sanchez⁴, Andrés Nacif⁴

(1) Universidad Nacional de San Luis., Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales, San Luis, Argentina

(2) CONICET, Argentina

(3) Universidad de Buenos Aires, Argentina

(4) Instituto Geofísico Sismológico Volponi - Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina

En este trabajo se obtuvieron modelos de la velocidad de las ondas Vs a partir de inversión conjunta de funciones receptoras (RF) y curvas de dispersión, para obtener las principales discontinuidades de la corteza y el manto superior debajo de la Sierra de San Luis.

El método de funciones receptoras (RF, por sus siglas en inglés), es una herramienta poderosa para conocer las principales discontinuidades (Owen et al. 1984, 1987) ya que es sensible a los cambios en la Vs. Una parte de las ondas P que incide en una interfaz entre dos medios se convierte en ondas S y viceversa, tanto reflejadas como transmitidas (Ammon 1997) y quedan reflejados estos cambios en el sismograma. Dentro de la sismología es una técnica que permite obtener información aun con una sola estación, siempre y cuando posea los 3 componentes. Las RFs se realizaron usando datos de la estación UNSL instalada en la localidad de La Florida, San Luis.

Es necesario conocer parte de la historia del Paleozoico inferior para lograr una interpretación de la estructura de la corteza en la provincia de San Luis, es decir, la evolución en la construcción del borde occidental del Gondwana entre los 480 y los 400 Ma. Se conocen dos ciclos orogénicos diferentes que afectaron las Sierras Pampeanas, el primero de edad neoproterozoica, generado por la colisión de un bloque pampeano contra el cratón del Río de La Plata (Ramos et al. 2010), o bien, la colisión de una dorsal centro-oceánica (Tibaldi et al. 2021). Este ciclo estructuró las rocas que se ubican al este de la estación sismológica UNSL, hacia la provincia de Córdoba. Un segundo ciclo, el Famatiniano, se caracteriza por el desarrollo de un arco magmático que luego es acrecionado contra el orógeno pampeano debido a la colisión de un bloque exótico procedente de Laurentia en el Ordovícico medio tardío (460 Ma), conocido como Cuyania-Precordillera (Astini y Dávila 2004, Ramos et al. 2004). Las rocas que caracterizan a esta orogenia se localizan justo debajo de la estación UNSL, y se extienden hacia el oeste de la misma, hasta el límite con la provincia de Mendoza (mega lineamiento o sutura de Valle Fértil-Desaguadero). La evolución de la orogenia Famatiniana en las Sierras Pampeanas Orientales, luego de la estabilización del Orógeno Pampeano, se caracteriza por el desarrollo de un magmatismo de arco y retroarco emplazado hacia el este de las Sierras Pampeanas Occidentales (Otamendi et al. 2008, 2009, 2020, Cristofolini et al. 2014), reconocido según Rapela et al. (1998) como un arco interno (inner arc) de edad ordovícica temprano. La colisión de Cuyania en el Ordovícico Medio (460 Ma) generó una fuerte deformación en el borde del Gondwana a través del desarrollo de un conjunto de zonas de cizallas de escala regional (Martino et al. 2003, Höckenreiner et al. 2003, Vujovich et al. 2008, Cristofolini et al. 2014, Larrovere et al. 2017, Christiansen et al. 2019, entre otros). Algunas de ellas fueron datadas para el periodo Silúrico-Devónico por Steenken et al. (2010), y atraviesan en diferentes direcciones la región analizada. La colisión de Cuyania-Precordillera produjo también una imbricación en el basamento de las sierras Pampeanas Orientales. La corteza batolítica famatiniana está expuesta y yuxtapuesta por encima de las rocas del antearco. Además, se producen escamas tectónicas del bloque de Cuyania dando origen a las Sierras Pampeanas Occidentales. En el retroarco (Sierra de San Luis) la deformación produjo una estructura bivergente (Morosini et al. 2021), justo debajo de la localización de la estación La Florida. Luego, durante el ciclo orogénico Achaiano (colisión de Chilenia contra Cuyania durante el Devónico) se reactivaron algunas de las cizallas previas y se emplazaron batolitos y plutones graníticos de intraplaca (Sims et al. 1998, Stuart-Smith et al. 1999). Luego de estos eventos se consolida la estructura interna del basamento cristalino, y a partir de entonces la deformación es netamente de carácter frágil y asociada a la estructuración del ciclo Andino. No obstante, las estructuras ocurridas durante el paleozoico en la construcción del orógeno Famatiniano, juegan un importante control pasivo en el desarrollo y localización de las estructuras modernas (Bense et al. 2017).

Se obtuvieron datos de telesismos registrados en la estación de banda ancha UNSL instalada, junto al Instituto Geofísico Sismológico Ing. Volponi de la Universidad Nacional de San Juan. Dicha estación estuvo ubicada en el punto 33,123°S; 66,0268°O, altura 1.043 m desde 2017 a diciembre de 2021. Se seleccionaron eventos usando el catálogo global de la USGS (United States Geological Survey) con magnitudes superiores a Mw 5,8 y distancias epicentrales superiores a 30° e inferiores a 90°. Fueron utilizados eventos en todos los rangos de profundidad. Con los mismos se trabajó aplicando el método de función receptora, y luego de obtenerlas, se descartaron aquellos demasiado ruidosos. Para calcular el tiempo de arribo de la onda P a la estación se utilizó el programa llamado Taup (Crotwell et al. 1999) a partir de un modelo de velocidades global. Posteriormente los registros fueron cortados en una ventana de tiempo de 10 seg. antes y 90 seg. después de la llegada de la onda P. Se seleccionaron los seis sismos que presentaron registros con una mejor relación señal/ruido y se usó de un filtro de nivel de agua (water-level) de 0,01. El filtro gaussiano seleccionado fue de 2,5 Hz. Usando la inversión conjunta de las RF y una curva de dispersión publicada en la región por Ammirati et al. (2018) se obtuvo un modelo de velocidad para cada uno de los sismos trabajados. Luego, con inversión conjunta de todos los sismos, se obtuvo un modelo promedio y modelos separados de velocidad para sismos provenientes del NO y del NE. Utilizando la información del parámetro del rayo de cada uno de los sismos y mediante cálculos trigonométricos se determinaron las distancias horizontales por donde ingresa cada rayo debajo de la estación en la dirección del azimut. Los resultados obtenidos se muestran tanto para los sismos provenientes del noroeste como para los del noreste (Figura 1). El modelo de velocidad obtenido a partir de sismos del noroeste (Centro y Norte América) presenta una disminución de velocidad a los 10 km de profundidad (3,7 a 3,45 km/s) y a partir de allí un aumento progresivo de velocidad desde los 3,45 a 3,9 km/s aproximadamente. A los 45 km de profundidad también se hace notar un aumento importante de velocidades que va de 4,5 a 4,7 km/s relacionado a la discontinuidad de Mohorovicic. Por debajo de los 60 km de profundidad y hasta los 80 km la velocidad desciende de 4,95 a 4,4 km/s, y se incrementa levemente a 4,65 km/s desde los 80 a los 100 km de profundidad.

El modelo de velocidades obtenido a partir de sismos provenientes del noreste, se obtuvo con sismos provenientes del sector de la dorsal central meso-atlántica y en la isla Ascensión, ubicados en el Océano Atlántico. Los resultados de este modelo indican una disminución de velocidad de 4 a 3,5 km/s en un rango de 5 a 12 km de profundidad, indicando allí una posible discontinuidad.

Un marcado ascenso de velocidades de 3,7 km/s a 4,3 km/s se produce a los 20 km de profundidad y una tercera discontinuidad se observa a los 42-45 km de profundidad debido al incremento de velocidades de 4.5 a 4.8 km/s. Entre los 60 y 100 km de profundidad se produce una disminución de la velocidad de 4,85 a 4,55 km/s.

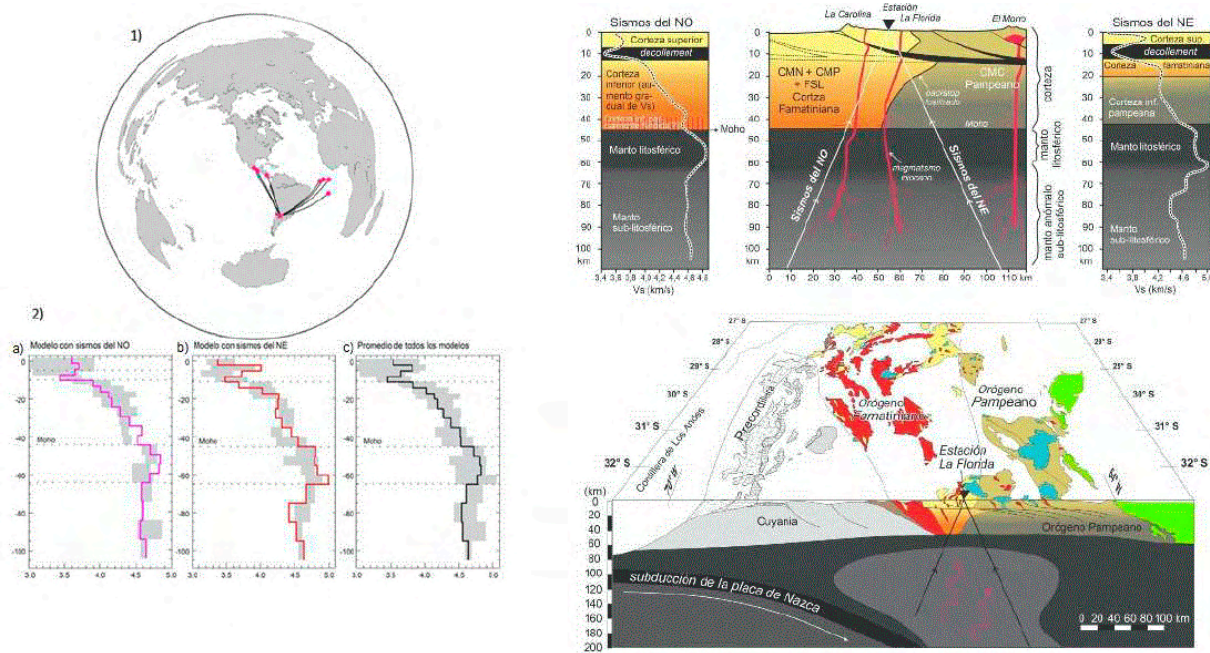


Figura 1. Izquierda: localizaciones de los sismos trabajados. Derecha: Esquema interpretativo de la litósfera a partir de los modelos de velocidades obtenidos. Se marcan con líneas negras los rayos de incidencia promedios para cada conjunto de sismos proyectados sobre el plano latitudinal del perfil.

En el modelo del noroeste se puede observar presencia de discontinuidades menos marcadas en los primeros kilómetros de profundidad, a diferencia del modelo del noreste. Esto podría deberse a una corteza más mafica hacia el NO (probablemente asociada con el arco magmático pampeano) mientras que para el sector NE se puede interpretar una corteza claramente dividida en capas heterogéneas ya que en esta zona los parámetros elásticos de las rocas van cambiando progresivamente con la profundidad. Hacia el noreste la corteza tiene una discontinuidad bien definida a los 18 km que puede interpretarse como un límite estructural entre dos tipos de cortezas. En cambio, al noroeste hay un incremento gradual en las velocidades corticales, lo que podría sugerir solo cambios composicionales graduales más que límites estructurales netos. En los dos modelos hay una gran disminución hacia los 10 km de profundidad, que podría ser un nivel de despegue estructural asociado a las fallas que actualmente estructuran la Sierra de San Luis. Hacia los 42 km de profundidad por el cambio en la velocidad de las ondas S en ambos modelos inferimos que se localiza el Mohorovicic. Por debajo de la discontinuidad del Moho, entre los 45 km y los 65 km aproximadamente, hay un aumento de la velocidad de la onda S que varía entre los 4,6 y 5 km/s. Estas velocidades sugieren la presencia de un manto litosférico delgado ya que entre los 65 km y 100 km hay un descenso de la velocidad de la onda S que varían entre 4,4 y 4,7 km/s. Este valor anómalo podría indicar un cambio en la reología del manto con presencia de manto sublitosférico parcialmente fundido. Pequeños grados de fusión parcial en el manto, son suficientes para que cambien las condiciones reológicas del mismo y se genere un marcado descenso de la velocidad de las ondas. Esta fusión parcial podría lograrse por deshidratación de los sedimentos oceánicos incorporados y de las rocas hidratadas de la placa subducente. La liberación de agua durante este proceso metamórfico es la responsable de la fusión parcial del manto (Stolper y Newman 1994). Se debe tener en cuenta que la subducción de la placa de Nazca inclina de manera normal los primeros 100 km, para luego permanecer horizontal al menos unos 300 km hacia el este, a la latitud aproximada de los 32°S (Cahill et al. 1992). Esta geometría plana de la subducción de la placa ha impedido el desarrollo del magmatismo mioceno en la zona cordillerana y ha sido correlacionada con el levantamiento del basamento de las Sierras Pampeanas, por lo que no hay magmatismo en el arco ya que la cuña astenosférica ha sido desplazada hacia el este y consigo el magmatismo (Kay et al. 1991, Kay y Mpodozis 2002). El vulcanismo representado en la sierra del Morro corresponde a las etapas finales de este magmatismo relacionado con la subducción de la placa. El Morro se destaca como un bloque metamórfico levantado por una combinación de inyecciones de magma y deformación tectónica que ha sido datado entre $1,9 \pm 2$ Ma (Urbina 2005, Sruoga et al. 2017). Las rocas volcánicas del Morro, aunque están ubicadas a más de 500 km de la trinchera, pertenecen a asociaciones calcoalcalinas de arco con tendencias geoquímicas de intraplaca, y son una evidencia del traslado de la cuña astenosférica hacia el antepaís (Kay et al. 1991). Teniendo en cuenta esto, el descenso de velocidad de las ondas S en el modelo propuesto, también puede adjudicarse a la influencia de este magmatismo en el manto que infrayace a la Sierra de San Luis como una consecuencia directa de la zona de subducción.

Si bien existen varias interpretaciones para explicar la anomalía térmica que produjo el magmatismo en la Sierra de San Luis, tales como un quiebre abrupto en la corteza oceánica subducida, una rajadura paralela a la dorsal asísmica Juan Fernández, una tracción, rotura y hundimiento de la placa subducida, un punto caliente subductándose, o bien, simplemente un cambio en el ángulo de subducción de la losa (Kay y Mpodozis 2002, Lynner et al. 2017, Haddon y Porter 2018, Gao et al. 2021, y sus referencias), todas las teorías permiten explicar la disminución de velocidad de la onda S entre los 65 km y los 100 km como consecuencia de un comportamiento más plástico al promedio mantélico, y por lo tanto, vincularlo aunque sea de una manera residual, a vulcanismo ocurrido a partir del Mioceno en la Sierra de San Luis.

Palabras Clave: corteza, discontinuidad, sierras, argentina, sismos.

Financiamiento: Este trabajo ha sido posible gracias al aporte económico de los proyectos PICT 2019- 00854, PROIPRO-UNSL 03-1520, EU35-UNSL10806, PICT 2016-0269 y PROICO-UNSL 03-1818. También queremos agradecer al Dr. Jordi Juliá por permitirnos el acceso a sus códigos de procesamiento.

Agradecimientos: Gracias a la colaboración aportada por el Instituto Geofísico Sismológico Volponi de la UNSJ .. También queremos agradecer al Dr. Jordi Juliá por permitirnos el acceso a sus códigos de procesamiento.

Referencias:

- Ammirati, J.B., et al. 2018. Tectonophysics 740–741: 42-52.
- Ammon, C.J. <http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/RftnDocs/rfinv01.html>, accessed 2015, published 1997.
- Astini, R.A. et al. 2004. Tectonics, 23: TC4008.
- Bense, F., et al. 2017. Andean Geology 44 (3):275-306.
- Cahill, T., et al. 1992. J. Geophys. Res. 97: 17503-17529.
- Christiansen, R. et al. 2019. Tectonophysics 756: 1-24.
- Cristofolini, E.A. et al. 2014. Journal of South American Earth Sciences 56: 170-185.
- Crotwell, H.P. et al. 1999. Seismological Research Letters 70: 154-160.
- Feng, M. et al. 2004. Physics of the Earth and Planetary Interiors 147(4): 315-331.
- Gao, Y. et al. 2021. Geophysical Research Letters 48: e2021GL095509.
- Haddon, A. et al. 2018. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 19: 4021–4034.
- Kay, S. et al. 2002. Journal of South American Earth Sciences 15: 39-57.
- Larrovere, M.A. et al. 2017. 20° Congreso Geológico Argentino, Relatorio, 579-601, Buenos Aires.
- Lynner, C. et al. 2017. Geophysical Research Letters. 44: 6735-6742.
- Martino, R.D. 2003. Revista de la Asociación Geológica Argentina 58 (4): 549-571.
- Morosini, A. et al. 2021. Journal of South American Earth Sciences 105: 102986.
- Otamendi, J.E. et al. 2020. Journal South American Earth Science. 100: 102558.
- Owens, T.J. et al. 1984. Journal of Geophysical Research: 89(B9), 7783-779.
- Ramos, V.A. 2010. Geological Journal 45: 2-25.
- Rapela, C.W. et al. 1998. Geology 26: 707-710.
- Sims, J.P. et al. 1998. The Proto-Andean Margin of Gondwana: Geological Society, London, Special Publications 142: 259-281.
- Sruoga, P. et al. 2017. Journal of Volcanology and Geothermal Research 337: 81 – 97.
- Steenken, A. et al. 2010. International Journal of Earth Sciences, 100; 2-3: 465-488.
- Stuart-Smith et al. 1999. Geological Society of America, Special Paper 336: 87-114.
- Tibaldi, A.M. et al. 2021. Journal of South American Earth Sciences 106:1.
- Vujovich, G.I. et al. 2008. XVII Congreso Geológico Argentino, Actas I: 55-56, Jujuy.

Tomografía sísmica en Chile Centro-Norte (24.5°S - 29°S): Interpretaciones geológicas, implicancias y límites en los modelos de velocidad

Nicolás Hernández-Soto¹, Matthew Robert Miller², Marcos Simón Moreno Switt³, Dietrich Lange⁴, Diego González-Vidal⁵

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería UC, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul - Santiago - Chile

(4) GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Dynamik des Ozeanbodens FE Marine Geodynamik, Wischhofstraße 1-3 D-24148 Kiel, Kiel, Deutschland

(5) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Independencia 631, Valdivia, Los Ríos, Valdivia, Chile

Durante el año 2020 desplegamos la red sísmica ANILLO (Y6) entre 24.5°S y 29°S en Chile Centro-Norte, abarcando el gap sísmico de Atacama y sus alrededores. Los registros realizados hasta 2022 por cerca de 80 estaciones -incluyendo instrumentos continuos previamente instalados (C1: CSN; CX: GEOFON)- permitieron el análisis de las formas de onda y picado de arribo de fases de ondas de cuerpo mediante técnicas de Machine Learning (EQTransformer; Mousavi et al. (2020)), con lo que logramos la obtención de un catálogo sísmico con una magnitud de completitud de 1.6, albergando más de 30500 eventos con magnitud local que varía entre 0.6 y 5.7 (González-Vidal et al., bajo revisión).

Considerando un subconjunto con los mejores eventos homogéneamente distribuidos en el volumen de estudios, para garantizar una gran cobertura homogénea de rayos dentro de la región de interés, aplicamos VELEST (Kissling et al., 1994) y realizamos iteraciones sobre un modelo inicial cercano a nuestra zona de estudios (Husen et al., (2000)) alternando entre refinamiento del modelo de velocidad y relocalización de eventos sísmicos hasta converger a un modelo inicial de velocidades que representa a la zona. El subconjunto de datos usado está compuesto por 1000 eventos, con 26570 llegadas P y 22109 llegadas S. Establecido el marco base unidimensional, realizamos inversiones escalonadas basadas en el método de mínimos cuadrados amortiguados mediante el código SIMUL2000 (Thurber & Eberhart-Phillips, (1999)) dando libertad tanto a los parámetros de los nuevos modelos de velocidad, y a la localización de los hipocentros. Extendidos entre los límites latitudinales del área de estudios, y de manera iterativa agregamos nodos de velocidad en la dirección perpendicular a la fosa, hasta llegar a un modelo bidimensional de Vp y Vp/Vs. Usando dicho modelo como nuevo escalafón, agregamos perfiles de nodos en la dirección paralela a la fosa y, iteración por iteración, densificamos la cantidad de nodos en esta dirección, lo que nos permitió obtener un modelo final de Vp y Vp/Vs en tres dimensiones. El desarrollo de la referencia unidimensional y el posterior modelo bidimensional redujeron los residuales en los tiempos de arribo de ondas de cuerpo, y en la incertidumbre en la localización de los eventos sísmicos, tanto del subconjunto de hipocentros, como del catálogo completo.

Finalmente, aplicamos técnicas de validación a los resultados para establecer los límites espaciales de confiabilidad, los tamaños mínimos de estructuras interpretables, y para delimitar los bordes en los cuales la relación entre nodos permite inferir información sobre el modelo de velocidades de ondas de cuerpo y la razón Vp/Vs. Así, los rangos de confiabilidad se relacionan directamente con la configuración espacial de la red sismológica, entregando información confiable por unos 300 km aproximadamente entre la línea de costa por el Oeste, hasta el comienzo del arco volcánico hacia el Este. Desafortunadamente, la falta de instrumentos de fondo marino y en el trasarco imposibilita la total interpretación de estructuras y procesos de gran escala que pueden tener lugar en las cercanías de la fosa y en el arco volcánico.

La relocalización de sismicidad alcanza hipocentros hasta los ~120 km de profundidad, y su distribución espacial coincide mayoritariamente con a) la ubicación de la interfaz de placas (Hayes et al., (2018)), y b) con procesos de actividad minera en superficie. La primera característica tiende a mostrar un cúmulo principal de sismicidad entre los 20 y 50 km de profundidad, delimitando la zona sismogénica entre estas latitudes, y a grandes profundidades da paso a notorias bandas sísmicas que siguen la distribución de parches con elevado valor de Vp/Vs, asociados al slab subductante, y que incluso sugieren procesos de deshidratación del slab a elevadas profundidades (~60 y ~70 km). La segunda presenta elevado aglutinamiento somero, y se centra principalmente en los dominios morfoestructurales de la Cordillera de la Costa y la Precordillera. La relación entre sismicidad y actividad de fallas corticales debe ser evaluada a fondo mediante el estudio de las formas de onda, para identificar las fuentes explosivas y determinar los mecanismos de los eventos telúricos. Finalmente, la distribución de Vp muestra una debilitada cuña del manto alcanzando espesores no mayores 25 km, lo que coincide con trabajos anteriores para el norte de Chile (e.g., Pastén-Araya et al., (2021)). A su vez, dicho espesor disminuye en magnitud de sur a norte. Finalmente, la distribución de valores de Vp y Vp/Vs son indicativos de la existencia de al menos tres estructuras principales superficiales emplazadas entre los 100 y 200 km desde la fosa, que serán discutidas en un análisis geológico preliminar.

Palabras Clave: gap sísmico de Atacama, Sismología, Tomografía Sísmica, Vp Vp/Vs, Relocalización de hipocentros.

Financiamiento: Programa Nacional de Becas de Postgrado, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Proyecto ANILLO Precursor ACT192169, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo. Dirección de Postgrados, Universidad de Concepción.

Agradecimientos: Proyecto ANILLO PRECURSOR ACT192169, a ANID (Grant D-21210575), y a la Dirección de Postgrados (Universidad de Concepción), por su apoyo en la realización de esta investigación doctoral.

Referencias:

- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61.
- Husen, S., Kissling, E., & Flueh, E. R. (2000). Local earthquake tomography of shallow subduction in north Chile: A combined onshore and offshore study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28183-28198.
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D., & Kradolfer, U. (1994). Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), 19635-19646.
- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature communications*, 11(1), 3952.
- Pastén-Araya, F., Potin, B., Ruiz, S., Zerbst, L., Aden-Antoniów, F., Azúa, K., ... & Fuenzalida, A. (2021). Seismicity in the upper plate of the Northern Chilean offshore forearc: Evidence of splay fault south of the Mejillones Peninsula. *Tectonophysics*, 800, 228706.
- Thurber, C., & Eberhart-Phillips, D. (1999). Local earthquake tomography with flexible gridding. *Computers & Geosciences*, 25(7), 809-818.
- González-Vidal D., Relation between oceanic plate structure, patterns of interplate locking and microseismicity in the 1922 Atacama Seismic Gap.

Contribuciones a un nuevo modelo tectónico de los Andes Sur Centrales a través de la tomografía sísmica local

Andrea Paz Navarro-Aránguiz¹, Diana Comte²⁻³, María Pía Rodríguez⁴, Marcelo Farías¹, Steven Roecker⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) AMTC, Universidad de Chile, Ciencias Físicas y Matemáticas

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Universidad de Atacama, Chile

(5) RPI, Troy, New York, Estados Unidos

Estudios sismológicos han logrado caracterizar la litósfera continental en el margen chileno a través de modelos de velocidad de ondas sísmicas (Comte et al., 2019; Navarro-Aránguiz et al., 2023). Estos han revelado una geometría de "crustal wedge" bajo la Cordillera de La Costa, la cual designan como Cuña de Subducción tal como la planteada por Brandon (2004), basada en la "cuña de Coulomb" y que en su versión de doble vergencia explica la formación de orógenos en distintos estadios.

En específico, la cuña de subducción ha sido interpretada a partir de tomografías sísmicas en las zonas de Illapel y Valparaíso. En Illapel, hacia el este, los resultados del modelo de velocidad de ondas sísmicas muestra una anomalía de bajo Vp/Vs justamente debajo de la Cordillera Frontal (lado más al oeste de los Andes en dicha latitud), la que Comte et al., 2019 interpretan como parte de la "Andean Wedge", proponiendo la existencia de dos cuñas interactuando en el margen surcentral de sudamérica. Por otra parte, en la zona de Valparaíso, la cuña de subducción, de acuerdo a las imágenes de la tomografía sísmica, posee variaciones en su tamaño a lo largo del rumbo, lo que podría deberse a que la zona de "retrocizalle" está controlada por las condiciones locales de la cuña mantélica (Navarro-Aránguiz et al., 2022).

Considerando el contexto anterior y con el objetivo de obtener un modelo detallado de la estructura litosférica regional del segmento chileno del "flat-slab" pampeanos, realizamos campañas de instalación de una red sísmica de 83 estaciones de período corto que registraron datos desde diciembre del 2018 a enero del 2020, incluyendo el período del terremoto del 2019 en Coquimbo.

Con los resultados del procesamiento directo y posterior inversión, desarrollamos modelos 3D de velocidades de ondas de cuerpo con los que buscamos corroborar las hipótesis de: (1) existe una geometría de cuña de subducción también entre los 27-30°S que debería presentar variaciones en su tamaño debido a estructuras en la placa oceánica, tales como montes submarinos y zonas de fractura; y (2) existe una geometría de cuña Andina la cual estaría en coalescencia entre los 27-30°S.

En base a nuestros resultados, proponemos para la zona del margen costero pacífico del "flat-slab" pampeano, que (1) la cuña de subducción presenta variaciones producto de estructuras puntuales en el slab (como zonas de fractura, montes submarinos); (2) la cuña de subducción estaría acoplada a otra cuña, denominada cuña andina (Comte et al., 2019); (3) la forma en que estas cuñas interactúan con la subducción podría ser la de "ramp-flat"; (4) las grandes anomalías de alto Vp/Vs que interrumpen la cuña de subducción en algunos perfiles, parecen responder, a la presencia de fluidos en zonas cercanas a la losa oceánica (que no permiten un desarrollo amplio de la cuña, dado que no facilitan el proceso de erosión tectónica) y a un extenso arco extinto, ya que coinciden con el cinturón metalogénico.

Palabras Clave: Tomografía sísmica, subducción, erosión tectónica, cuña orogénica, flat slab.

Estabilidad de facies y reacciones metamórficas en el slab de la Placa de Nazca

Martin Andrés Riedel Hornig¹⁻², Andrés Tassara¹⁻²

(1) Universidad de Concepción

(2) Núcleo Milenio El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción

Las zonas de subducción son ambientes complejos donde interactúan múltiples procesos produciendo distintos tipos de sismicidad. Entre ellos se encuentra la sismicidad intraplaca de profundidad intermedia, la cual ocurre dentro de la placa subductada en condiciones que debiesen favorecer deformación dúctil sobre frágil. Para este tipo de sismicidad se ha observado mundialmente variabilidad en el tipo de mecanismos focales y en su distribución espacial. En algunas zonas de subducción los hipocentros se ordenan formando una doble zona de sismicidad mientras que en otros no. Además, estos sismos pueden ocurrir, por medio de mecanismos diferentes, en condiciones hidratadas y deshidratadas. Por ello hasta el momento no existe consenso en cuanto a los procesos que los originan.

En el contexto de zonas de subducción hidratadas, como en el caso del margen chileno, se suele considerar la influencia de fluidos liberados durante el metamorfismo del slab subductado como principal responsable. Por ello es importante conocer en qué condiciones de presión y temperatura y entre que asociaciones minerales ocurren estas reacciones y en especial cuanto fluido liberan para así poder cuantificar su relación con los sismos.

Hacker *et al.* (2003) recopilaron información de mineralogía y composiciones de roca total promedio para múltiples zonas de subducción alrededor del mundo, creando diagramas de fase globales que han permitido el estudio de las reacciones de deshidratación asociadas a la sismicidad intra-slab. Sin embargo, al ser diagramas construidos en base a composiciones globales no representan ninguna placa en particular.

Para obtener una mayor precisión acerca de las condiciones en las que ocurren reacciones de deshidratación dentro de la placa de Nazca entre los 15° y 45° S en este trabajo crearemos pseudosecciones específicas para esta placa. Para ello calcularemos una composición promedio de la corteza de esta, utilizando datos de muestras obtenidas de perforaciones o dragadas del fondo marino (eg. Scheidegger y Corliss, 1981 y Batiza *et al.* 1982). Por otra parte, para el manto litosférico utilizaremos composiciones estandarizadas (harzburgita y serpentinita). Incluiremos además variaciones regionales asociadas al magmatismo y volcanismo en el Ridge de Juan Fernández, siendo esta la principal estructura dentro de nuestra área de estudio que pudiese producir heterogeneidad composicional en el slab.

A partir de esta información calcularemos pseudosecciones para la placa de Nazca y propiedades físicas y químicas propias de cada asociación de fases minerales como su densidad, porcentaje de hidratación y velocidades de ondas teóricas utilizando el software *Perple_X*, el cual se basa en la reducción de la energía libre de Gibbs para calcular la estabilidad de fases. Contrastaremos esta información con datos geofísicos (densidades, velocidades de ondas, entre otros, calculadas por eg.: Tassara *et al.* 2006, Ranero y Sallarès 2004 y Garth y Rietbrock 2017) para constreñir y validar nuestro modelo. Pondremos énfasis particular en el grado de hidratación alcanzado por el slab antes de subductar y la cantidad de fluidos que es posible liberar, explorando distintos porcentajes de hidratación en concordancia con datos sísmicos y geofísicos.

Utilizando la información anterior junto al modelo termal de Catalán *et al.* (in prep.) crearemos perfiles de estabilidad mineral en la placa de Nazca los que nos permitirán evaluar la coincidencia de las zonas de reacciones de deshidratación con sismicidad intra-slab y estudiar las causas de esta coincidencia o falta de ella.

Palabras Clave: Pseudosección, Modelamiento petrológico, Subducción.

Financiamiento: Beca ANID de Doctorado Nacional CYCLO NCN19_167.

Referencias:

- Batiza, R., Oestrike, R., & Futa, K. (1982). Chemical and isotopic diversity in basalts dredged from the East Pacific Rise at 10 S, the fossil Galapagos Rise and the Nazca Plate. *Marine Geology*, 49(1-2), 115-132.
- Garth, T., & Rietbrock, A. (2017). Constraining the hydration of the subducting Nazca plate beneath Northern Chile using subduction zone guided waves. *Earth and Planetary Science Letters*, 474, 237-247.
- Hacker, B. R., Abers, G. A., & Peacock, S. M. (2003). Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2029.
- Ranero, C. R., & Sallarès, V. (2004). Geophysical evidence for hydration of the crust and mantle of the Nazca plate during bending at the north Chile trench. *Geology*, 32(7), 549-552.
- Scheidegger, K. F., & Corliss, J. B. (1981). Petrogenesis and secondary alteration of upper layer 2 basalts of the Nazca plate. *Geological Society of America Memoirs*, 154, 77-107.
- Tassara, A., Götze, H. J., Schmidt, S., & Hackney, R. (2006). Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9).

Plume driven plate motion changes: new insights from the South Atlantic realm

Ingo Leonardo Stotz Canales¹, Berta Vilacís¹, Jorge N. Hayek¹, Sara Carena¹, Hans-Peter Bunge¹

(1) Ludwig-Maximilians-Universität München, Department of Earth Sciences, Theresienstr. 28, Munich, Germany

Plate motion changes are increasingly well documented in the geologic record. Directional plate motion changes, in particular, provide powerful constraints on plate tectonic torques, because they require a change in plate boundary torques, basal shear stresses or both that can be spatially located. Over the past years a pressure driven, so-called Poiseuille, flow model for upper mantle flux in the asthenosphere has gained increasing geodynamic attention – for a number of fluid dynamic arguments. This conceptually simple model makes a powerful testable prediction: Poiseuille flow induced plate motion changes should coincide with inter regional scale mantle convection induced dynamic topography around the origin of the Poiseuille source.

In this study we analyse available constraints on the Cenozoic kinematic plate history of the South American plate together with a novel stratigraphic framework based on the principle of hiatus analysis. The stratigraphic framework provides proxy information for continent scale paleo elevation. Combining these newly available constraints we show for the first time that: (i) Paleogene and Eocene/Oligocene Poiseuille flow induced by the Sierra Leone and Tristan plumes provide a compelling explanation for the observed coeval velocity and topographic changes in the South Atlantic (i.e., South America and Africa), and (ii) the Sierra Leone and Tristan plume push torques are suitably located to drive the directional changes and to explain the South American plate motion history in the context of a quantitative geodynamic torque balance analysis.

We apply Poiseuille/Couette flow models to show that the Sierra Leone and Tristan plumes are suitably located to provide the torque to initiate these plate motion changes. We conclude that the Poiseuille flow model constitutes a geodynamical viable model to explain the Cenozoic South American plate motion changes. We believe that our joint interpretation of observations, which are usually considered in isolation (i.e., plate motion changes and dynamic topographic changes), together with our deliberately simple analytical approach, provides physical insight into key parameters. Our modelling results are entirely consistent with changes in proxy elevation in the African and South American continents at those times. Moreover, they imply that it is possible to locate torques from sources of active upper mantle flow that can explain directional plate motion changes and identify them for the South American plate with geological features such as the Sierra Leone and Tristan plumes.

Keywords: Plate kinematics, Mantle convection, Poiseuille/Couette flow, Dynamic topography, South American plate.

Financing: ILS acknowledges support from the Deutsche Forschungsgemeinschaft project number ST01271/2-1. BV was funded by DFG, research training group 2698/1 (UPLIFT), project number 440512084. JNH acknowledges support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under the ERC-2019-STG project TEAR, grant no. 852992.

Geology of the deep Andean crust combining crustal seismicity and thermal structure

Andrés Tassara¹, Martin Riedel¹, Iñigo Echeverría¹

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Facultad Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

Temperature controls the maximum depth of seismicity because it governs the transition between seismogenic brittle deformation at shallow depths to aseismic thermally-activated ductile creep at higher depths. We investigate this relationship relating crustal seismicity recorded by Centro Sismológico Nacional (CSN) with the temperature distribution computed by us inside the South American plate. We develop our own analytical formulation of the thermal state of the upper plate based on a 1D conductive geotherm with crustal heat production and known temperature at the base of the plate. To the east of the intersection of the subducted slab with the continental lithosphere-asthenosphere boundary (LAB), temperature at the LAB depth is prescribed by an asthenospheric adiabat. To the west of this intersection, temperature along the megathrust is calculated with the analytical expression of England (2018) that depends on the age and subduction velocity of the slab, megathrust friction, thermal conductivity and upper plate heat production. Because the shape of the megathrust and continental LAB for the study region are well constrained with geophysical data (Tassara and Echaurren, 2012), we can extrapolate the 1D approach to 3D and cover the entire margin between the trench and the eastern foreland. We select a preferred set of involved parameters (the preferred thermal model) by fitting a new compilation of surface heat flow measurements. Our results are then compared with the depth of earthquakes recorded along the study region by the CSN catalogue. For crustal earthquakes (located above the Moho depth), we computed at each location on a regular grid the seismicity cutoff depth (SCD), i.e. the depth defining the bottom of a layer where 95% of crustal earthquakes occur. As expected, the spatial distribution of SCD is positively correlated with temperature, although the actual average temperature for a given SCD value can be different for different geological regions.

Exploring this relationship, we consider that the depth of the brittle-ductile transition (BDT), i.e. the point where the seismic brittle yield strength is equal to the aseismic ductile yield strength, must coincide with the seismicity cut-off depth. We compute the BDT from the 3D thermal model assuming that the temperature-dependent ductile yield strength is defined by a dislocation creep constitutive rheological law and brittle strength increases linearly with depth. As creep parameters obtained by laboratory experiments are available for a wide range of crustal lithologies, we actually compute a large number of BDTs underneath a given grid node. We then compare these BDT estimates against the estimated SCD at each in order to select the rock composition that minimizes the difference between both. With this method, we obtain a seismically-optimized crustal lithology at each grid node, from which we construct a geological map of the mid-lower Andean crust. Interestingly, this map shows notable spatial correlations with the surface geology structure and geophysical images of the Andean margin.

Keywords: Reología, Sismicidad, Margen Andino.

Financing: Núcleo Milenio CYCLO NCN19_167.

References:

- England, P. (2018). On shear stresses, temperatures, and the maximum magnitudes of earthquakes at convergent plate boundaries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), 7165-7202.
- Tassara, A., & Echaurren, A. (2012). Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International*, 189(1), 161-168.

Subducción de dorsales activas y geodinámica en ventanas astenosféricas, perspectivas desde la modelación numérica 2D y 3D

Jorge Sanhueza¹, **Gonzalo Yáñez**¹, Roger Buck², Jaime Araya Vargas³⁻⁴, Amol Dayanand Sawant², Eugenio Veloso⁵

(1) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York 10964, USA.

(3) Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

(4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Universidad de Chile, Santiago, Chile

(5) Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Curauma, Valparaíso

La interacción dorsal activa-fosa es un fenómeno recurrente en la historia geológica en la mayoría de las zonas de subducción, dejando un registro claro en el magmatismo, deformación, relieve y sismicidad. En el margen oriental del Pacífico, múltiples dorsales activas han subductado bajo continentes durante el Cenozoico. La subducción de dorsales activas ha sido vinculada a la apertura de ventanas astenosféricas, en donde su geometría depende de las tasas de expansión del piso oceánico, la cinemática del continente y zonas de fracturas. La geodinámica asociada a la subducción de dorsales activas y ventanas astenosféricas en el tiempo es poco entendida en la actualidad y se ha podido inferir mediante el registro geológico y observaciones geofísicas. La interrupción del magmatismo de arco y la generación de plateau basálticos en el antearco se ha atribuido a un ascenso del manto debido a la apertura de la ventana astenosférica posterior a la subducción de una dorsal oceánica activa. Por otro lado, tomografías sísmicas indican anomalías de baja velocidad en la proyección de la ventana astenosférica, las cuales se han vinculado con anomalías de alta temperatura en el manto superior. Sin embargo, no se ha estudiado de forma rigurosa, tanto espacial como temporalmente, la geodinámica de la astenósfera durante la subducción de dorsales activas y posterior apertura de ventanas astenosféricas. En esta investigación, se realizaron modelaciones numéricas dinámicas en 2D y cinemáticas en 3D para explicar observaciones geológicas y geofísicas en ventanas astenosféricas actuales en Sudamérica, Antártica y Norteamérica. Resultados de modelaciones dinámicas 2D en el punto triple en Chile replican la separación de la placa de Nazca y la apertura de la ventana astenosférica bajo Sudamérica. Durante la apertura, manto parcialmente fundido proveniente de la dorsal oceánica activa migra debajo de la placa continental. La evolución temporal de la temperatura es consistente con mediciones de flujo de calor, metamorfismo de alta temperatura y magmatismo en el antearco. Por otro lado, la migración de manto parcialmente fundido logra explicar las anomalías sísmicas de baja velocidad y baja viscosidad inferidas. Finalmente, la separación de la placa de Nazca genera un régimen extensional en el antearco con un aumento en la topografía, la cual se estabiliza en un régimen compresivo con la subducción de la placa Antártica. Resultados preliminares de modelaciones cinemáticas 3D indican que el ascenso y altas temperaturas en el manto superior están controladas por la expansión del piso oceánico, la cinemática de la placa cabalgante y la oblicuidad del eje de la dorsal activa. Estos parámetros también controlan el grado de fusión parcial y flujo de fundidos parciales, los cuales se vinculan con la geoquímica de los productos magmáticos. Tanto las anomalías de temperatura como el flujo en la astenósfera en los modelos son consistentes con anomalías sísmicas y anisotropía del manto superior en las ventanas astenosféricas en Sudamérica, Antártica y Norteamérica. Finalmente, se propone una metodología para estimar el ascenso de manto (matriz y fundidos parciales) y anomalías de temperatura en función de la oblicuidad del eje de la dorsal activa y la razón entre la velocidad de expansión del piso oceánico y velocidad del continente, las cuales permiten estimar la geodinámica en ventanas astenosféricas en el pasado. Estos distintos enfoques de modelación numérica serán consolidados en modelaciones 4D (3D+tiempo) en las distintas ventanas astenosféricas de Sudamérica, Antártica y Norteamérica con aplicaciones a subducción de múltiples dorsales activas bajo continentes como en el caso de Tierra del Fuego durante el Cenozoico.

Palabras Clave: ventana astenosférica, Chile Triple Junction, subducción de dorsales oceánicas, geodinámica, modelación numérica.

Financiamiento: Beca Doctorado Nacional ANID 21210747FONDECYT 1201354.

Agradecimientos: Agradecemos a Steve Cande y Sofía Lagarrigue por discusiones del flujo de calor, Andrew Lloyd y Hannah Mark por discutir alcances en tomografías sísmicas.

Control estructural y geometría de fallas activas, asociadas a erosión por subducción y su potencial peligrosidad entre los 32°–33° S, Valparaíso, Chile

Camilo Joaquín Acuña Hinojosa¹, Ximena Contardo¹

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

La evolución geodinámica entre los 32°–33°S se relaciona con los procesos de erosión por subducción del ridge de Juan Fernández, determinando las morfoestructuras del margen. El progresivo avance de montes submarinos bajo la corteza continental, desde hace unos 10 Ma, determinó la formación de la cuenca de Valparaíso, extendida ampliamente en el talud y limitada hacia el este por una angosta plataforma. A lo largo de la costa, se evidencian alzamientos diferenciales e importante retroceso de acantilados situados al NE de Caleta Horcón. El fallamiento activo consiste predominantemente de estructuras normales NE, NW y NS. Sin embargo, es poco conocido el control estructural y geometría de fallas a esta latitud. Estudios previos evidencian una estructura de rumbo N75°E/45°W y salto de 60 cm, asociado a un paleo terremoto tsunamigénico, identificado en el límite entre el miembro inferior y superior de la Formación Horcón, incrementando la vulnerabilidad de la zona. Considerando lo anterior, este estudio intenta comprender y precisar el control estructural asociado al área de estudio a través de un modelo de esfuerzos que representa el comportamiento de fallas siguiendo patrones de Riedel. A lo largo del acantilado costero se identificaron al menos 3 orientaciones predominantes de fallas normales con componente en el rumbo. El dominio NE representa la falla maestra con movimiento dextral. Las fallas NW se presentan como fracturas de tipo R y T. Adicionalmente, mediante tomografía sísmica se identificó una estructura subsuperficial de rumbo NE, correlacionable con la estructura principal. De este modo, la geometría de las fallas es consistente con la aplicación del modelo de Riedel. El retroceso del acantilado y caída de bloques, si bien está afectado por el clima y el oleaje, se encuentra principalmente controlado por el fallamiento activo, evidenciándose con mayor intensidad en los acantilados situados entre el sector sur de Playa Larga y NE de Caleta Horcón determinando una elevada peligrosidad para las construcciones existentes en el área.

Palabras Clave: Erosión por subducción, Riedel, Tomografía sísmica, Transtensión y transpresión, Estructura en flor negativa.

Financiamiento: No aplica.

Referencias:

- Carrillo-Briceño, J. D., Gonzáles-Barba, G., Landaeta, M. F., & Nielsen, S. N. (2013). Condrictios fósiles del Plioceno Superior de la Formación Horcón, Región de Valparaíso, Chile Central. *Revista Chilena de Historia Natural* 86, 191-206.
- Espinoza, S. (2022). Facies tsunamigénicas en el límite marino transicional de la Fm Horcón, evidencia de paleoterremoto inducido por la subducción del JFR a los 33°S, Valparaíso, Chile.
- Laursen, J., Scholl, D. W., & Von Huene, R. (2002). Neotectonic deformation of the central Chile margin: Deepwater forearc basin formation in response to hotspot ridge and seamount subduction. *TECTONICS*, VOL. 21, NO. 5. doi:10.1029/2001TC901023.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer Brucherscheinungen - zentralblatt fuer mineralogie, Geologie und Paleontologie. 354-368.
- Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la Ligua y la cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Watts, A. B., Koppers, A. A., & Robinson, D. P. (2010). seamount subduction and earthquakes. *oceanography*, Vol 23, N1.

Análisis de la Actividad Neotectónica de la Falla Melocotón Sur y Aguas de Pizarro en el Piedemonte de la Precordillera Mendocina, Argentina (32°58' - 33°s)

Danaiss Ivette Agurto Madriz¹, Matías Peña¹, Rodrigo Quiroga²⁻³, José Mescua²⁻⁴, Víctor García⁵, Sebastián Perroud⁶

(1) Universidad Mayor, Geología, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Institute for Geosciences, Potsdam University, Germany

(3) Grupo de Tectónica, IANIGLA, CONICET, Argentina

(4) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

(5) Programa de Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, 15088, Lima, Perú

(6) Escuela de Geología, Universidad Santo Tomás, Avenida Ejército 146, Santiago, Chile

En el límite sur del *flat-slab* Pampeano, específicamente entre los 32°58' - 33°S, se han identificado estructuras con actividad cuaternaria al occidente de la ciudad de Mendoza, relacionadas con el alzamiento del Cordón del Plata y la Precordillera Sur (Giambiagi *et al.*, 2014). La actividad cuaternaria relacionada a estas estructuras del piedemonte de la ciudad de Mendoza, Argentina, es conocida en sus aspectos más generales, principalmente asociadas a fallas inversas con rumbo NS y NNE - SSW, con registro de actividad durante el Pleistoceno Superior - Holoceno (García y Casa, 2015), que controlan la geometría de los depósitos aterrazados fluvio-aluviales como se han podido observar a detalle al norte de la ciudad de Mendoza (*i.e.* García y Casa, 2015).

Este tipo de estructuras está asociada a sismos someros de intraplaca (<35 km), los cuales pueden ser devastadores en áreas urbanas cercanas a la fuente, destacando en particular los terremotos ocurridos en Mendoza en 1861 (Ms 7,2) y 1985 (Mw 6,2 a 5 km de profundidad; USGS, 2023). Este trabajo se enfoca en el sector sur del piedemonte, donde convergen las Fallas Melocotón Sur y Aguas de Pizarro. Aunque se ha reconocido la presencia de estos sistemas de falla a nivel regional, la continuidad y la arquitectura de estas es materia de discusión.

Esta contribución es para compartir los avances en la caracterización estructural y cinemática, para comprender la actividad reciente de las Fallas Melocotón Sur y Aguas de Pizarro. Para este fin se utilizaron modelos de elevación digital de alta resolución y fotografías panorámicas obtenidos con vuelos de vehículos aéreos no tripulados (VANT), datos de deformación frágil y reconocimiento de las distintas unidades geológicas para caracterizar la deformación reciente del piedemonte mendocino.

A partir de los levantamientos de campo, se reconocieron cuatro superficies fluvio-aluviales (Q), siendo Q3 la más antigua y Q0 la más joven, donde Q2 y Q3 se encuentran plegadas y con desplazamientos verticales de aproximadamente 30 ± 4 m y 90 ± 5 m. En el sector de Crucecita, se identificaron fallas neógenas que alcanzan el basamento por sobre los depósitos del Cuaternario. Además, se observaron indicadores cinemáticos, indicando un fallamiento inverso con dirección de contracción E-W. Los modelos de elevación digital de alta resolución obtenidos muestran una pendiente regional hacia el este, pero también revelan una ligera inclinación de pendiente hacia el oeste que ha sido influenciada por la presencia de fallas con vergencia oriental. Los nuevos levantamientos topográficos y estructurales de detalle realizados han contribuido a mejorar la caracterización cinemática y neotectónica del sector sur del piedemonte mendocino. Las observaciones de terreno y análisis de los modelos de elevación digital de alta resolución confirman que las fallas activas elevaron los depósitos aterrazados, reafirmando su relación con la propagación del frente orogénico de la Precordillera Sur hacia el este.

Palabras Clave: Neotectónica, Fallas activas, Piedemonte, Frente Orogénico.

Referencias:

- Costa, C., Machette, M. N., Dart, R., Bastías, H., Paredes, J., Perucca, L. P., Haller, K. (2000a). Map and database of Quaternary faults and folds in Argentina. US Geological Survey Open-File Report, 108, 75.
- Costa, C. (2004). Neotectónica. En Gonzales, M.A y Bejerman, N. J. (Ed.), Peligrosidad Geológica en Argentina, Metodologías de Análisis y Mapeo (329 - 356). Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.
- García, V. H., y Casa, A. L. (2015). Quaternary tectonics and seismic potential of the Andean retrowedge at 33-34 S. Geological Society, London, Special Publications, 399(1), 311-327.
- Giambiagi, L.B., Mescua, J.F., Heredia, N., Farías, P., García-Sansegundo, J., Fernández, C., Stier, S., Perez, D., Bechis, F., Moreiras, S.M., Lossada, A., (2014). Reactivation of Paleozoic structures during Cenozoic deformation in the Cordón del Plata and Southern Precordillera ranges (Mendoza, Argentina). Journal of Iberian Geology, 40(2), 309-320.

Interacción entre terremotos históricos en la brecha sísmica de Chile central y la falla cortical Marga-Marga: La amenaza sísmica de la región de Valparaíso

Javiera Álvarez Vargas¹, María Ignacia Calisto Burgos¹, Jorge Crempien de la Carrera²

(1) Universidad de Concepción, Geofísica, Ciencias Físicas y Matemáticas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago, Chile

La caracterización de la distribución espacial de las rupturas de terremotos históricos de un segmento sísmico desempeña un papel fundamental tanto en la comprensión del ciclo sísmico de los grandes terremotos en zonas de subducción en dicha área, como para evaluar la amenaza potencial asociada a futuros eventos sísmicos.

Debido a su comportamiento tectónico, Chile ha sido afectado por megaterremotos de considerable magnitud, tal como Valdivia 1960, Maule 2010 y más recientemente Illapel 2015. Sin embargo, existen ciertas zonas que se consideran en estado de brecha sísmica, que, aunque han tenido sismos de magnitudes considerables, no cumplen con las propiedades de liberación de energía y profundidad requeridas para descargar la fricción contenida. Todos estos terremotos que son parte de etapas del ciclo sísmico interactúan con diferentes características geológicas del segmento donde se emplazan. Tal es el caso de fallas corticales, las cuales pueden inducir *stresses* diferentes a los esperados sólo por terremotos debido a su tipo de estructura superficial, tal como fue mostrado para el caso interacción entre la ruptura del terremoto de Maule 2010 y el segmento de fallas activas de Pichilemu en el trabajo de Farias et al., 2011. Esta dinámica se manifiesta en distintas regiones del país, pero es la zona central de Chile, específicamente la región de Valparaíso, la zona relevante para este estudio. Dicha región, ha permanecido en ese estado de brecha sísmica desde el último gran terremoto con deslizamiento superficial ocurrido en el año 1730, donde a través del terremoto del Maule 2010 e Illapel 2015, se produjo la ruptura únicamente en los segmentos sur y norte en el área mencionada. A pesar de tener sismicidad en los años 1822, 1906, 1985 y 2017, y con presencia de la falla cortical Marga-Marga ubicada en Viña del Mar, la liberación de energía no ha sido suficiente para desencadenar la secuencia sísmica esperada por un evento somero.

Esta investigación identifica y cuantifica la interacción entre la falla subductante en el segmento de Valparaíso y la falla Marga-Marga, con el fin de evaluar la amenaza sísmica de la zona circundante. Para ello, primeramente, se simuló mediante el programa de elementos de frontera Tectosaur un ciclo sísmico considerando una conexión entre ambas fallas, siguiendo la metodología de Herrera et al., 2021, donde microterremotos interaccionan con la falla Marga-Marga, dando como resultado la vibración de la falla cortical debido a la compresión entre ambas. En segundo lugar, para los megaterremotos históricos, se caracterizaron sus distribuciones de deslizamiento mediante un enfoque estocástico de fuentes sísmicas utilizando la metodología de Cifuentes et al., 2023, específicamente para los de 1730 y 1906. Los resultados de esta caracterización proporcionaron patrones de deslizamiento asociados con eventos tsunamigénicos históricos en el sector, reconstruyendo parte de su actividad sísmica. Utilizando estos resultados, se aplica análisis de Coulomb para calcular los esfuerzos entre estos eventos sísmicos históricos de la falla de subducción de la región de Valparaíso y la falla cortical Marga-Marga.

Con lo anterior, la intención de esta investigación es exponer una metodología de estudio sísmico pertinente para la región de Valparaíso y la falla cortical, donde a través de los resultados obtenidos, se intenta reducir la vulnerabilidad de la región al comprender su comportamiento pasado como respuesta a una posible amenaza futura.

Palabras Clave: subducción, falla, interacción, terremotos, histórico.

Financiamiento: Se está postulando a fondos de Núcleo Milenio Cyclo, además de fondos provenientes de la Universidad de Concepción. Lo anterior, está condicionado a la aceptación del trabajo.

Referencias:

- Aron, F., Allmendinger, R. W., Cembrano, J., González, G., & Yáñez, G. (2013). Permanent fore-arc extension and seismic segmentation: Insights from the 2010 Maule earthquake, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(2), 724-739.
- Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. A. (2017). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(5), 3648-3660.
- Cifuentes-Lobos, R., Calisto, I., MacInnes, B., Moreno, M., Quezada, J., San Martín, J., ... & Saavedra, C. (2023). A stochastic approach to the characterization of the seismic sources: a potential method for the assessment of sources of historical and paleo tsunamis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-13.
- Farias, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., & Pardo, M. (2011). Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 30(6).
- Herrera, M., Crempien, J., Cembrano, J., & Moreno, M. (2021). Seismic cycle segmentation in Central Chile subduction zone due to fault geometry anomalies. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2021, December, pp. S55D-0181).
- Javiera San Martín, Ignacia Calisto, Jorge Quezada et al. (2023). Characterization of historical megathrust earthquake ruptures in Central Chile using logic tree analysis, 08 May 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2813614/v1>].
- Li, S., Moreno, M., Bedford, J., Rosenau, M., & Oncken, O. (2015). Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru-North Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(6), 4522-4538.

Conexión entre fallas corticales activas y el megathrust en el área del Salar Grande (21°S, 70°W), región de Tarapacá

Jaime Araya Vargas¹, Francisco Polanco¹, Miguel García¹, Daniel Díaz²⁻³

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Santiago, Chile

(3) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

Diversos estudios indican que en zonas de subducción existirían interacciones complejas entre la mega-zona de falla interplaca (el *megathrust*) y fallas presentes en la corteza de la placa superior (p.ej. Cortés-Aranda et al., 2022). Mientras algunos trabajos han interpretado la generación de sismicidad o deslizamiento en fallas en la placa superior como consecuencia de procesos gatillados en el *megathrust* (p.ej. Farías et al., 2011; Melnick et al., 2012), otros sugieren que actividad en fallas corticales preceden a la generación de sismos de gran magnitud ($M > 8$) en el *megathrust* (p.ej., González et al., 2015). Un área excepcional para estudiar estos procesos es el sector de Salar Grande en la región de Tarapacá (21°S, 70°W), donde se tienen evidencias de intensa actividad neotectónica y sismicidad actual en la corteza continental (p.ej., Bloch et al., 2014; González et al., 2021). En esta contribución se presentan los resultados de un estudio magnetotélúrico realizado recientemente en el sector del Salar Grande que busca caracterizar la arquitectura estructural de la corteza continental e identificar potenciales conexiones de estas fallas con el *megathrust*. Se analiza también la capacidad de resolución que tienen estudios magnetotélúricos para caracterizar la estructura de resistividad eléctrica del *megathrust*, ya que a la fecha ninguno de los estudios magnetotélúricos realizados en el antearco del norte de Chile ha logrado delinear el *megathrust* como un rasgo distinguible dentro de un antearco dominado por altas resistividades eléctricas (Lezaeta, 2001; Brasse et al., 2002; Kühn et al., 2014; Brändlein, 2013; Araya Vargas et al., 2019; Ślęzak et al., 2021). El modelo de resistividad eléctrica derivado del estudio magnetotélúrico es comparado con las zonas de la corteza continental donde se concentra la sismicidad, para identificar si existen evidencias adicionales que pudieran vincular la actividad sísmica en fallas de la corteza continental con la sismicidad y deslizamiento asísmico detectado en el *megathrust* por estudios previos (Sippl et al., 2018; Socquet et al., 2018).

Palabras Clave: Sismicidad cortical, Megathrust, Salar Grande, Magnetotélúrica.

Financiamiento: Este estudio ha sido financiado por el proyecto FONDECYT/ANID 11221266.

Referencias:

- Araya Vargas, J., et al. (2019). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 4017–4034.
- Bloch, W., et al. (2014). Geophysical Journal International, 197, 1744–1749.
- Brändlein, D. (2013). Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin, Germany.
- Brasse, H., et al. (2002). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B5).
- Cortés-Aranda, J., et al. (2022). Tectonics, 41, e2021TC006956.
- Farías, M. et al. (2011). Tectonics, 30, TC6010.
- González, G., et al. (2015). Geology, 43, 671–674.
- González, G., et al. (2021). Scientific Reports, 11(1), 1–12.
- Kühn, C., et al. (2014). Earth, Planets and Space, 66, 112.
- Lezaeta, P. (2001). Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin, Germany.
- Melnick, D., et al. (2012). Geology, 40, 251–254.
- Sippl, C., et al. (2018). Journal of Geophysical Research Solid Earth, 123, 4063–4087.
- Ślęzak, K., et al. (2021). Physics of Earth and Planetary Interiors, 318, 106765.
- Socquet, A., et al. (2017). Geophysical Research Letters, 44, 4046–4053.

The River Structure of Fault-Bounded Mountains Can Be Used to Inform Seismic Hazard Assessments

Felipe Aron¹⁻²⁻⁸, Samuel A. Johnstone²⁻³, Andreas Mavrommatis⁴, Robert Sare²⁻⁵, Frantz Maerten⁶, John P. Loveless⁷,
Curtis W. Baden², George E. Hilley²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) & Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(2) Stanford University, Department of Earth and Planetary Sciences (Formerly Geological Sciences), Stanford, CA, USA

(3) U.S. Geological Survey, Geosciences and Environmental Change Science Center, Denver, CO, USA

(4) Stanford University, Department of Geophysics, Stanford, CA, USA

(5) Google LLC, Mountain View, CA, USA

(6) YouWol, Le Lancaster, Pérols, France

(7) Smith College, Department of Geosciences, Northampton, MA, USA

(8) *Now at Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

The 1989, Mw 6.9 Loma Prieta earthquake resulted in tens of lives lost and cost California almost 3% of its gross domestic product. Despite widespread damage, the earthquake did not clearly rupture the surface, challenging the identification and characterization of these hidden hazards. Here, we show that they can be illuminated by inverting fluvial topography for slip- and moment accrual-rates — fundamental components in earthquake hazard assessments — along relief-generating geologic faults.

Large, shallow earthquakes nucleated on geologic faults promoting vertical motion of rocks produce instantaneous uplift of the Earth's surface on the order of meters. This process and the intervening deformations, repeated over thousands of earthquake cycles, build up mountain ranges, which are subsequently carved by rivers thanks to the action of climate forces counteracting tectonic uplift. Consequently, the incision pattern along mountain rivers, resulting from rock resistance to erosion and long-lived distribution of fault-induced rock uplift, contains information about the past activity of underlying, relief-generating faults. Our study tested this fundamental idea, integrating the topography with simple, yet standard mechanical and erosional modeling, to estimate the accrual of earthquake magnitude potential over time.

We applied this new methodology, particularly useful to illuminate hazards posed by difficult-to-characterize-faults not well exposed to direct observation, to thrust faults bounding the mountains along the western side of Silicon Valley in the San Francisco Bay Area. Our results indicate that within this area it is possible to reconcile geologic (10^6 a), topographic (10^{5-6} a), paleoseismic (10^{2-3} a), and geodetic (10^{1-2} a) observations of plate motion, fault slip and surface displacements — a fundamental and outstanding problem in tectonics. Moreover, we discovered that a quake of similar size to the 1989 Loma Prieta event, the last devastating earthquake affecting this populous economic hub, could occur every 250–300 years. And perhaps more importantly, given the wide availability of topographic datasets, this method may be deployed broadly to evaluate seismic hazards in poorly instrumented and studied areas.

Keywords: Bridging earthquakes and mountain building, Seismic hazards, Inversion of tectonics from topography, Coupling erosional and mechanical models, Quantifying fault slip- and moment accrual-rates.

References:

- Based on: Aron, F.; Johnstone, S. A.; Mavrommatis, A. P.; Sare, R. M.; Maerten, F.; Loveless, J. P.; Baden, C. W.; & Hilley, G. E. (2022). Mountain rivers reveal the earthquake hazard of geologic faults in Silicon Valley. *Geophysical Research Letters*, 49(19), e2022GL099220, [doi:10.1029/2022GL099220](https://doi.org/10.1029/2022GL099220).

Neotectónica del antearco en terrazas marinas del MIS 19 (789 ka) entre los 27°26'S y 70°45'W

Carlos Asenjo Fernandoy¹, **Angela Burgos Gutiérrez¹**, Patricio Zambrano Lobos¹

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Concepción, Chile

En la costa de la Región de Atacama en Chile, las terrazas marinas han brindado una valiosa oportunidad para estudiar los cambios del nivel glacioeustático y la actividad neotectónica. En el sector de Puerto Viejo se ha observado la presencia de fallas que sugieren una actividad neotectónica significativa en la zona, lo cual es crucial para comprender la dinámica tectónica del antearco andino y su relación con la actividad sísmica de la región. Esta área forma parte del antearco andino, donde se produce la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. En cuanto a la placa oceánica, posee una batimetría compleja en donde se presentan estructuras de cadenas de montes submarinos, en este caso, el Ridge de Copiapó, mesetas oceánicas, zonas de fracturas, etc. Es importante mencionar esta batimetría, ya que tienen un impacto en la tectónica de la zona del margen continental, lo cual resulta en una mayor actividad sísmica tanto en el margen como en el interior del continente. En consecuencia, los esfuerzos generados por la subducción de estos elementos afectan la corteza continental, ocasionando tasas de deformación más elevadas. En este estudio, se llevaron a cabo levantamientos topográficos y análisis estructurales en un sector minero específico ubicado en las coordenadas 27°26'S y 70°45'W, con el objetivo de identificar y caracterizar las fallas presentes en la terraza.

Los resultados obtenidos han contribuido a mejorar nuestra comprensión de la actividad tectónica reciente en esta zona. El mapeo realizado en el área de Puerto Viejo (Caldera) muestra que las terrazas marinas más elevadas, cuyas edades según **Quezada, González, Dunai, Jensen y Juez-Larré (2007)** corresponden al MIS 19 (780 ka), 21 (860 ka) y 25 (950 ka), se apoyan en inconformidad sobre granitoides jurásicos y están afectadas por fallas inversas de alto ángulo con dirección **NNE-NE**. La distribución de este estilo de deformación es muy localizada respecto a la plataforma de abrasión marina emergida, ya que consiste en un conjunto de fallas que afecta un área de **8x6 km²**. Los sedimentos deformados pertenecen a la sucesión alta de la unidad Estratos de Caldera, caracterizada por facies de coquinas de foreshore y shoreface dominados por oleaje. A lo largo de una de las fallas principales se identificó un yacimiento mineral con vetas controladas estructuralmente, halos de alteración hidrotermal y zonas de mineralización aurífera.

Los resultados indican que la falla inversa principal es de alto ángulo y pone en contacto por falla a las rocas intrusivas jurásicas sobre las coquinas de Estratos de Caldera. En este sector se observó una potente brecha de falla con clastos de ambas litologías, esquistosidad de zona de cizalle y alteración hidrotermal leve, así como un pliegue de arrastre donde los estratos de coquina se encuentran levemente plegados. Sedimentológicamente, parte de la secuencia presenta un nivel de brechas coluviales que evidencian una sedimentación sincrónica con la deformación, es decir, depósitos syn-tectónicos. Desde el punto de vista geomorfológico, la deformación neotectónica se expresa superficialmente en escarpes de falla que presentan desniveles que van de centímetros hasta 12 metros. Es importante destacar el hallazgo de estas estructuras, ya que no hay registros previos de este tipo de deformación en la zona. Los resultados indican que se trata de una falla inversa de alto ángulo, posiblemente reactivada de estructuras de rumbo asociadas al Sistema de Falla de Atacama.

Nuestra hipótesis consiste en que la deformación aislada en estudio es producto de la deformación del antearco por la subducción de un conjunto de grandes seamounts que pertenecen al Ridge de Copiapó. La ubicación espacial del Ridge de Copiapó a lo largo de la interfaz podría explicar la morfología del alto batimétrico alineado como respuesta a la subducción del monte submarino en el área y la deformación puntual observada por nosotros en el área de estudio. Este descubrimiento es un aporte al entendimiento de la neotectónica de la plataforma marina emergida a la latitud de Copiapó. Como resultado de esta actividad tectónica durante el Pleistoceno, se alzó un sector puntual que contiene varios marcadores neotectónicos. Es necesario realizar estudios geológicos y geofísicos detallados en el área específica para obtener una comprensión más precisa de la relación entre la sismicidad neotectónica y la mineralización aurífera en esta región.

Palabras Clave: Neotectónica, Puerto Viejo, terraza, glacioeustatismo.

Referencias:

- Quezada, Jorge, González, Gabriel, Dunai, Tibor, Jensen, Arturo, & Juez-Larré, Joaquim. (2007). Alzamiento litoral Pleistoceno del norte de Chile: edades 21Ne de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa.

Cartografía LiDAR de la traza de la Falla San Ramón en Pirque: Deformación cuaternaria e implicancias para el peligro sísmico

Nicolas Campillay Horta¹, Gabriel Easton Vargas¹

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas

La Falla San Ramón (FSR) es una falla inversa y activa ubicada en el piedemonte del borde occidental de la Cordillera Principal de Los Andes, a lo largo de una zona densamente urbanizada en el sector oriente de la ciudad de Santiago. La traza de FSR sólo ha sido definida frente a la ciudad de Santiago, pero existen evidencias sismológicas que sugieren que esta podría continuar hacia el sur hacia la comuna de Pirque (Ammirati *et al.*, 2019). El presente trabajo tiene por objetivo la cartografía de la traza de la FSR hacia el sur, en la comuna de Pirque. Esto permitirá dilucidar el real potencial sísmico de la estructura, determinando la continuidad de esta hacia dicha zona. Por medio de una nube de puntos LiDAR (2-10 pulsos/m²), posterior al filtrado de artefactos, se generó un MET (Modelo de Elevación de Terreno) de alta resolución (1 m de resolución espacial), junto a ortoimágenes de 0,25 m de resolución espacial se identificaron y cartografiaron escarpes de falla y otros rasgos que afectan unidades geomorfológicas cuaternarias del piedemonte cordillerano. Se estudiaron 350 perfiles topográficos de orientación E-O espaciados cada 50 m. De estos, 236 muestran rasgos geomorfológicos atribuibles a la actividad más reciente de la FSR distribuidos a lo largo del frente de montaña, entre los cuales se encuentran: escarpes de falla con mediciones de separación vertical del terreno (*offset*) entre 6 y 0,5 m; escarpes de falla con influencia antropogénica; abombamiento del terreno; y cambios de pendiente de campo lejano. Los rasgos observados sugieren que la impronta de la FSR sobre el paisaje es apreciable entre el Río Maipo y Quebrada Honda, evidenciando su continuidad por 18 km en superficie, bajo la comuna de Pirque. El peligro sísmico asociado a una potencial ruptura en superficie durante un terremoto mayor es estimado entre Mw=7,1-7,5 y una zona de ruptura del orden de 380 m determinada a partir de una función de densidad de probabilidades confeccionada por un estudio bibliográfico comparativo con otras rupturas en el mundo (Boncio *et al.*, 2018), según la cual albergaría 3 de 4 rupturas. La cartografía de detalle de la FSR indica que esta atraviesa sectores urbanizados con viviendas e infraestructura crítica, como también sectores rurales sin urbanizar, por lo tanto, se refuerza la necesidad de su incorporación como elemento de riesgo en las normativas urbanas regionales y comunales (Easton *et al.*, 2022), en particular en el Plan Regulador de Pirque para lograr un desarrollo armónico del territorio comunal, en especial de sus centros poblados.

Palabras Clave: Morfotectónica, Falla San Ramón, Peligro sísmico.

Financiamiento: - FONDECYT Regular 1190734. - FONDECYT Regular 1230350.

Referencias:

- Ammirati, J. B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., & Ruiz, S. (2019). The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1985-1999.
- Boncio, P., Liberi, F., Caldarella, M., & Nurminen, F. C. (2018). Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 241-256.
- Easton Vargas, G., Boroschek Krauskopf, R., Rebolledo Lemus, S., Inzulza Contardo, J., Ejsmentewicz Cáceres, D., Vergara Saavedra, P. y Giesen, E. (2022). Policy brief: La Falla San Ramón y la sostenibilidad del piedemonte de Santiago: recomendaciones para la política pública. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183864>.

Relación entre comportamiento sismogénico del megathrust y parámetros de subducción: Análisis estadístico global mediante Inteligencia Artificial

Lucas Crisosto Urrutia¹, Andrés Tassara Oddo²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultades de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

El comportamiento sismogénico del megathrust depende de la combinación de diversos factores geodinámicos que permanecen sin estar claros (Geller et al., 2015). Este comportamiento consta de la naturaleza y frecuencia de la actividad sísmica caracterizada por la distribución espacio-temporal de la sismicidad, que puede cuantificarse a través del b-value de la Ley de Gutenberg Richter (Gutenberg & Richter, 1944). Mediante distintos métodos y enfoques se ha intentado dilucidar la variabilidad de la naturaleza sísmica de los distintos ambientes de subducción. De esta forma diferentes autores ya han reportado diferencias de b-value y, por lo tanto, de variaciones del estado de stress en distintos segmentos a lo largo de diversas zonas de subducción (e.g. Carter & Berg, 1981; Nishikawa & Ide, 2014). En la literatura hay varios enfoques y opiniones, en algunos casos contradictorias, respecto al comportamiento sismogénico. Por un lado, éste se analiza evaluando simplemente la sismicidad histórica de una región, y por otro, se han realizado enfoques paramétricos basados en las características físicas de las zonas de subducción y valores críticos favorables para la generación de terremotos de megathrust (e.g. velocidad de placas tectónicas, edad de la placa subductante, espesor de sedimentos, largo de la fosa, etc). A pesar de los interesantes resultados obtenidos de estudios previos, principalmente de correlaciones lineales (Nishikawa & Ide, 2014; Ruff & Kanamori, 1980), la implementación de algoritmos de Machine Learning ha sido recomendada para entender procesos complejos no-lineales (e.g. Song et al., 2021; Liew et al., 2022). Dentro de estos procesos se incluye el comportamiento sismogénico que generalmente se atribuye al efecto de una sola variable. Entre estos recientes métodos destaca el trabajo de Schäfer & Wenzel (2019) donde se clusterizan segmentos de subducción que, a partir de una similitud entre diferentes propiedades, podrían presentar una máxima magnitud registrada en alguno de ellos. Por ello, este trabajo apunta a dilucidar el grado de influencia de ciertos parámetros geológico-geofísicos en el comportamiento sismogénico de segmentos de subducción a escala global mediante la implementación de algoritmos de Machine Learning Supervisado para problemas de regresión. Para llevar a cabo este estudio, en primera instancia se consideraron 157 transectas perpendiculares a la fosa en los principales sistemas de subducción a escala global. Para cada una de estas transectas, se cuantificaron distintas variables geodinámicas obtenidas a partir de la implementación computacional de distintos modelos digitales. Estas variables corresponden a la velocidad de las placas superior y subductante, edad de la placa subductante en la fosa, rugosidad del fondo oceánico, anchura lateral a lo largo de la fosa y ángulo de subducción entre 0-60, 60-120 y 120-250 km de profundidad. Posteriormente, son comparadas con el b-value de la Ley Gutenberg-Richter mediante el uso de dos algoritmos de Machine Learning: XGboost (Chen y Guestrin, 2016) y Shap value (Lundberg & Lee, 2017). Esto permite entender cómo las variables de entrada predicen de manera combinada la variable objetivo (b-value) a partir de distintas correlaciones encontradas. Los resultados preliminares de la investigación muestran que (1) el tipo de placa superior asociada a la zona de subducción, ya sea continental u oceánica, determina la forma en que los parámetros de subducción cuantificados repercuten en el b-value y, por lo tanto, en el estado de stress en los distintos segmentos de subducción a lo largo del planeta. (2) En casos donde la placa superior es de tipo continental, la velocidad de la misma es mostrada por el SHAP value como la variable con el mayor impacto en el b-value, seguido por la rugosidad del fondo oceánico y la velocidad de la placa subductante. (3) Por otro lado, en contactos de placa oceánica-oceánica, el SHAP value indica la velocidad de la placa subductante como la variable de mayor impacto en el b-value, seguido de la anchura lateral y el ángulo de subducción debajo de la zona sismogénica (~60 - 120 km). A pesar de los resultados preliminares obtenidos, mayor cantidad de pruebas y validación cruzada es todavía necesario para mejorar la capacidad predictiva de los algoritmos y establecer una mejor jerarquía sobre el impacto de las variables de subducción en el estado de stress a escala global.

Palabras Clave: b-value, Machine Learning, Megathrust, Parámetros de subducción.

Referencias:

- Carter, J. A., & Berg, E. (1981). Relative stress variations as determined by b-values from earthquakes in Circum-Pacific subduction zones. *Tectonophysics*, 76(3-4), 257-271.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining 2016*, August, (pp. 785-794).
- Geller, R. J., Mulargia, F., & Stark, P. B. (2015). Why we need a new paradigm of earthquake occurrence. *Subduction dynamics: from mantle flow to mega disasters*, 183-191.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 34(4), 185-188.
- Liew, B. X., Kovacs, F. M., Rügamer, D., & Royuela, A. (2022). Machine learning versus logistic regression for prognostic modelling in individuals with non-specific neck pain. *European Spine Journal*, 31(8), 2082-2091.
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Nishikawa, T., & Ide, S. (2014). Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy. *Nature Geoscience*, 7(12), 904-908.
- Ruff, L., & Kanamori, H. (1980). Seismicity and the subduction process. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 23(3), 240-252.
- Schäfer, A. M., & Wenzel, F. (2019). Global megathrust earthquake hazard—maximum magnitude assessment using multivariate machine learning. *Frontiers in Earth Science*, 7, 443496.
- Song, Y., Zheng, S., Li, L., Zhang, X., Zhang, X., Huang, Z., ... & Yang, Y. (2021). Deep learning enables accurate diagnosis of novel coronavirus (COVID-19) with CT images. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 18(6), 2775-2780.

Recent Updates Regarding Neotectonics of the southernmost Liquiñe-Ofqui Fault Zone in Chilean Patagonia Revealed from Lidar DEMs and Field Mapping

Gregory Paul De Pascale¹, Sebastian Perroud², Daniel Moncada², Mario Persico², Gabriel Easton², Francisco Gutiérrez⁵, Sergio A. Sepúlveda⁴, Reginald L. Hermanns³, Melanie J. Froude⁶, Ángelo Villalobos², Ivanna Penna³

(1) University of Iceland, Institute of Earth Science, 102, Reykjavik, Iceland

(2) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Geological Survey of Norway (NGU)

(4) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Burnaby, Canada

(5) GeoExpedition, Las Barrancas 25, Pirque, Chile

(6) University of Sheffield, Department of Geography, Sheffield, UK

The southernmost Liquiñe-Ofqui Fault Zone (LOFZ) in Aysen (Chilean Patagonia) is a major crustal fault that accommodates oblique subduction and has been a target of a decade long field and remote sensing program (partially supported by Fondecyt project 11160038) to address the neotectonics and seismic hazard there. Since the last Chilean Geologic Congress, some of the first research from this program was published (De Pascale et al., 2021) and new research is in the pipeline (Perroud and De Pascale, Submitted). A combination of remote sensing mapping, including the relationship of the LOFZ and the Southern Volcanic Zone (SVZ), showed that the master fault in the LOFZ controls the distribution of all volcanism, both monogenetic cones (e.g. cinder/spatter cones) as well as major stratovolcanoes from 41.5° S to the Hudson Volcano at ~45.5° S, with all of them found along or west of the main LOFZ until the Hudson Volcano. We discovered and characterised a previously undocumented major volcano, Volcan Mate Grande (VMG), which is found along the master LOFZ and also offset along the fault during field mapping and offsets along this volcano (which is post last glacial maximum), provide insight into the Holocene slip rate. Part of the main cone of the VMG collapsed forming a rock avalanche deposit that crosses the main LOFZ and part of the rock avalanche deposit is displaced northwards (dextrally) along the LOFZ, which cuts across the VMG and clearly visible with a fault scarp, by 170 ± 20 m. This Holocene slip, which suggests that considerable slip has taken place along the main trace of the LOFZ since this collapse took place and provides a dextral strike slip, slip rate here of ~14 mm/yr. Slightly to the south, at the Laguna San Rafael we collected a novel airborne light detection and ranging (lidar)-derived topographic model (the first fit-for-purpose fault lidar dataset in Chile) supported by field observations to map Quaternary deposits displaced along the Liquiñe-Ofqui fault. Dated glacier deposits, when combined with displacements, yield horizontal slip rates of $\sim 14 \pm 5$ mm/yr and are based on clear moraines that can be mapped on either side of the master LOFZ. Holocene vertical rates, up to the East, are some of the fastest on Earth, $\sim 6 \pm 3$ mm/yr. Because the dip slip is ~ 0 mm/yr 750 km to the north, the rapid neotectonic uplift here is localised (i.e. not found further to the north) and is likely due to the oblique subduction of the Chile Ridge and associated slab window, and contributes to some of the highest topography found in Patagonia (~4 km). The 2007 seismic sequence in Aysen provides insight to the seismic hazard of the master LOFZ and because the main fault did not rupture in 2007 there is a significant seismic hazard associated with this structure. These new data that are the outcome of this decade-long research program provides important new insight into the development of the Patagonian Andes, the Southern Volcanic Zone, and the seismic and volcanic hazard of Chilean Patagonia.

Palabras Clave: Liquiñe-Ofqui Fault Zone, Patagonia, seismic hazard, Southern Volcanic Zone, crustal faults.

Financiamiento: Fondecyt 11160038 University of Iceland's Earth Science Institute Start up Fund and University of Iceland's Research Fund 2023. CIMAR24 (CONA/SHOA).

Referencias:

- De Pascale, G.P., Froude, M., Penna, I. et al. (2021). Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Sci Rep* 11, 7069. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86413-w>.
- Perroud, S. and De Pascale, G. (Submitted). Fast Liquiñe-Ofqui Fault slip rates above the subducted Chile Ridge.

Neotectónica del antearco en terrazas marinas del MIS 19-25, Región de Atacama, Chile (27°26'S - 70°45'W)

Carlos Asenjo¹, **Lya Díaz**², Patricio Zambrano³

(1) Independiente

(2) Universidad Andrés Bello, sede República, Santiago

(3) Universidad Andrés Bello, Ingeniería, Autop. Concepción - Talcahuano 7100, Concepción, Chile

En la costa de la Región de Atacama en Chile, las terrazas marinas han brindado una valiosa oportunidad para estudiar los cambios del nivel glacioeustático y la actividad neotectónica. En particular, al sureste de la localidad de Puerto Viejo se ha observado la presencia de fallas que sugieren una actividad neotectónica significativa en la zona, lo cual es crucial para comprender la dinámica tectónica del antearco andino y su relación con la actividad sísmica de la región. Cabe mencionar que esta área forma parte del antearco andino, donde se produce la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. En cuanto a la placa oceánica, posee una batimetría compleja en donde se presentan estructuras de cadenas de montes submarinos, en este caso, el Ridge de Copiapó, mesetas oceánicas, zonas de fracturas, etc. Es importante mencionar esta batimetría, ya que tienen un impacto en la tectónica de la zona del margen continental, lo cual resulta en una particularidad sísmica tanto en el margen como en el interior del continente. En consecuencia, los esfuerzos generados por la subducción de estos elementos afectan la corteza continental, ocasionando deformación en la corteza superior. En este estudio, se llevaron a cabo levantamientos topográficos y análisis estructurales en un sector minero específico ubicado en las coordenadas 27°26'S y 70°45'W, con el objetivo de identificar y caracterizar una falla geológica poco estudiada que deforma a la unidad sedimentaria Estratos de Caldera. El mapeo realizado en el área al SE de Puerto Viejo (Caldera) muestra que las terrazas marinas más elevadas, cuyas edades según estudios previos corresponden al MIS 19 (780 ka), 21 (860 ka) y 25 (950 ka), se apoyan en inconformidad sobre granitoides jurásicos y están afectadas por fallas inversas de alto ángulo con dirección NNE-NE. La distribución de este estilo de deformación es muy localizada respecto a la plataforma de abrasión marina emergida, ya que consiste en un conjunto de fallas que afecta un área de 8x6 km². Los sedimentos deformados pertenecen a la sucesión alta de la unidad Estratos de Caldera, caracterizada por facies de coquinas de *foreshore* y *shoreface* dominados por oleaje. A lo largo de una de las fallas principales se identificó un yacimiento mineral con vetas controladas estructuralmente, halos de alteración hidrotermal y zonas de mineralización aurífera. Los resultados indican que la falla inversa principal es de alto ángulo y pone en contacto por falla a las rocas intrusivas jurásicas sobre las coquinas de Estratos de Caldera. En este sector se observó una potente brecha de falla con clastos de ambas litologías, esquistosidad de zona de cizalla y alteración hidrotermal leve, así como un pliegue de arrastre donde los estratos de coquina se encuentran levemente plegados. Sedimentológicamente, parte de la secuencia presenta un nivel de brechas coluviales que evidencian una sedimentación sincrónica con la deformación, es decir, depósitos sintectónicos. Desde el punto de vista geomorfológico, la deformación neotectónica se expresa superficialmente en escarpes de falla que presentan desniveles que van de centímetros hasta 12 metros. Sobre el bloque colgante descansan abanicos aluviales inactivos y terrazas marinas colgadas, por otro lado, desde los escarpes de falla nacen conos de deyección activos. Es importante destacar el hallazgo de estas estructuras, ya que no hay registros previos de este tipo de deformación en la zona. Los resultados indican que se trata de una falla inversa de alto ángulo, posiblemente reactivada de estructuras de rumbo asociadas al Sistema de Fallas de Atacama. Nuestra hipótesis consiste en que la deformación aislada en estudio es producto de la deformación del antearco por la subducción de un conjunto de grandes *seamounts* que pertenecen al Ridge de Copiapó. La ubicación espacial del Ridge de Copiapó a lo largo de la interfaz podría explicar la morfología del alto batimétrico que resalta en el *offshore* de nuestra zona de estudio y la deformación puntual observada por nosotros en el área de estudio, en el contexto de subducción de esta cadena de montes submarinos. Este descubrimiento es un aporte al entendimiento de la neotectónica de la plataforma marina emergida a la latitud de Copiapó. Es necesario realizar estudios geológicos y geofísicos detallados en el área específica para obtener una comprensión más precisa de la relación entre la sismicidad neotectónica y la mineralización aurífera en esta región.

Palabras Clave: terrazas marinas, neotectónica, ridge de Copiapó, fallas inversas de alto ángulo.

Financiamiento: Universidad Andrés Bello, sede Concepción.

Agradecimientos: Agradecemos al trabajador y único cuidador de la mina de oro, don René, por el apoyo a nuestra investigación otorgando el permiso de explorar las trincheras.

Referencias:

- Marquardt, C., Lavenue, A., Ortlieb, L., Godoy, E., & Comte, D. (2004). Coastal neotectonics in Southern Central Andes: uplift and deformation of marine terraces in Northern Chile (27° S). *Tectonophysics*, 394(3-4), 193-219.
- Ojeda, J., Morales-Yáñez, C., Ducret, G., Ruiz, S., Grandin, R., Doin, M. P., ... & Nocquet, J. M. (2023). Seismic and aseismic slip during the 2006 Copiapó swarm in North-Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104198.
- Railsback, L. B., Gibbard, P. L., Head, M. J., Voarintsoa, N. R. G., & Toucanne, S. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews*, 111, 94-106.
- Segerstrom, K. (1965a). Dissected gravels of the Rio Copiapo valley and adjacent coastal area, Chile. *Professional Paper-Geological Survey (U.S.)* 525-B, B117-B121.

Evidencias geoarqueológicas de un megaterremoto tsunamigénico Mw~9,5 ocurrido hace 3.800 años y su impacto en las comunidades tempranas de la costa hiperárida del Desierto de Atacama

Gabriel Easton¹, Diego Salazar², James Goff³, Jean L. Guendon⁴, José González-Alfaro¹, Pedro Andrade⁵, Ximena Villagrán⁶

- (1) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
(2) Universidad de Chile, Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Capitán Ignacio Carrera Pinto 1045, Santiago, Chile
(3) University of Southampton, School of Ocean and Earth Science, Southampton, United Kingdom
(4) Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France
(5) Universidad de Concepción, Carrera de Antropología, Concepción, Chile
(6) Universidade de São Paulo, Museu de Arqueologia e Etnologia, São Paulo, Brazil

Los primeros habitantes de la costa hiperárida del desierto de Atacama en el norte de Chile desarrollaron estrategias de resiliencia durante 12.000 años, lo que les permitió adaptarse de manera efectiva a este entorno extremo, incluido el impacto de megaterremotos y tsunamis gigantes generados en la subducción de las placas tectónicas de Nazca bajo la Sudamericana. Evidencia geoarqueológica revela que un gran terremoto tsunamigénico afectó severamente a las comunidades prehistóricas de cazadores, recolectores y pescadores hace ~3.800 años, causando una perturbación social excepcional reflejada en cambios contemporáneos en sitios arqueológicos distantes y desencadenando estrategias de resiliencia a lo largo de estas costas.

Nuestros resultados muestran que este megaterremoto tsunamigénico, el más importante del cual se tenga registro para el Holoceno tardío, habría sido contemporáneo a un paleotsunami que, de acuerdo al registro geológico, afectó el centro de Chile, el sur de Chile y las costas de Australia, Nueva Zelanda, Vanuatu y posiblemente Japón y Rusia. Este evento probablemente ocurrió como producto de la sincronización espacio-temporal de grandes segmentos tectónicos, con asperezas sísmicas lo suficientemente grandes como para producir una caída de tensión que superara las barreras o los límites estructurales, resultando en megaterremotos de esta magnitud a escalas de tiempo centenarias a milenarias.

Junto con los resultados de la modelación del tsunami, sugerimos que este evento fue producido por una ruptura sísmica que abarcó unos ~1.000 km a lo largo del contacto de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, entre las regiones de Tarapacá y Atacama, por el norte y sur, respectivamente, lo que destaca la posibilidad de ocurrencia de terremotos tsunamigénicos de esta magnitud en el norte de Chile, en donde se ha identificado una de los principales brechas sísmicas del planeta.

Estos resultados muestran la necesidad de aumentar la investigación científica interdisciplinaria como también la consideración de escalas temporales amplias para la evaluación del peligro de terremotos y tsunamis tanto en la brecha sísmica madura del norte de Chile, donde dichas evaluaciones se basan fundamentalmente en los registros de terremotos históricos, como en la cuenca del Pacífico, con el fin de mejorar y fomentar la gestión de amenazas y la reducción del riesgo de desastres. La comunicación de los resultados de tales investigaciones a través de medios formales e informales puede ayudar a re-introducir la memoria social de estos eventos en las comunidades locales, favoreciendo su resiliencia (Salazar et al., 2022).

Palabras Clave: Desierto de Atacama, Megaterremoto 9.5, Tsunami, Geoarqueología, Comunidades prehistóricas.

Financiamiento: Fondecyt 1151203, 1161547 y 1201387.

Agradecimientos: Agradecemos a los estudiantes y equipos de investigación de los proyectos Fondecyt 1151203, Fondecyt 1161547 y Fondecyt 1201387.

Referencias:

- Salazar, D., Easton, G., Goff, J., Guendon, J.L., González-Alfaro, J., Andrade, P., Villagrán, X., Fuentes, M., León, T., Abad, M., Izquierdo, T., Power, X., Sitzia, L., Álvarez, G., Villalobos, A., Olguín, L., Yrarrázaval, S., González, G., Flores, C., Borie, C., Castro, V., Campos, J., 2022. Did a 3800-year-old Mw~9.5 earthquake trigger major social disruption in the Atacama Desert? Science Advances, 8(14), eabm2996. DOI: [10.1126/sciadv.abm2996](https://doi.org/10.1126/sciadv.abm2996).

Geomorfología tectónica del frente montañoso de la Cordillera Principal entre los ríos Chillán y Diguillín, Comuna de Pinto, Chile (~36°48'S)

José Estay Herrera¹, Carolina Geoffroy¹, Rodrigo Rauld¹, Felipe García-Huidobro¹

(1) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre 194, oficina 61, Santiago, Chile

Los levantamientos topográficos LiDAR de alta resolución proveen una oportunidad excepcional para explorar el terreno bajo densas coberturas de vegetación. Particularmente, en el centro-sur de Chile hay bosque nativo o intensa actividad agrícola y/o forestal en los territorios de la transición entre la Depresión Central y la Cordillera Principal, dificultando la observación de perturbaciones geomorfológicas de pequeña o mediana escala. Recientemente, usando topografía LiDAR, fue posible detectar escarpes de falla bajo plantaciones forestales en el frente cordillerano cerca de Longaví (36°S; Sepúlveda et al., 2018; Sepúlveda, 2019); no obstante, estos hallazgos continúan siendo muy escasos y puntuales. En este estudio se presenta evidencia geomorfológica cuantitativa de posible actividad tectónica cuaternaria asociada a escarpes en el frente cordillerano de Pinto (36°48'S).

Utilizando un modelo de elevación digital de terreno (DTM) LiDAR de 2 m/px de resolución (MINVU, modificación Plan Regulador de la Comuna de Pinto), se analizaron dos escarpes topográficos erosionados que configuran un paisaje escalonado en el frente cordillerano entre los ríos Chillán y Diguillín. Estos escarpes son paralelos, tienen dirección NNW, presentan desniveles de ~50-60 m y largos de hasta ~6 km. El análisis remoto mediante mapas (sombras, pendiente y relieve local) y perfiles derivados del DTM, en combinación con un análisis de los perfiles de *thalweg* de los cauces que cruzan los escarpes, muestra un claro quiebre geomorfológico del paisaje, en particular con el escarpe más occidental. Además, el mapeo geológico-geomorfológico del área mediante el reconocimiento remoto del DTM y observaciones de terreno, se identificó una concentración anómala de remociones en masa en torno a los escarpes.

Los escarpes reconocidos podrían tener diferentes orígenes: (1) depositación de coladas de lavas o morrenas, (2) erosivo, y (3) actividad tectónica de fallas. Según los reconocimientos geológicos más actualizados a la fecha, en el área aflora la Fm. La Montaña (unidad pleistocena de origen fluvio-glacial, glaciolacustre, aluvial, lahárico y piroclástico; Gajardo, 1981), de ambiente periglacial y volcánico distal, no existiendo evidencias superficiales del arribo de glaciares al sector, que hayan dejado morrenas; o de coladas de lava emanadas del complejo central del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (Naranjo et al., 2008). El posible origen erosivo de los escarpes es más discutible. La posibilidad de que los cauces principales (paleo-ríos Chillán y Diguillín) puedan haber escurrido paralelos al frente de montaña durante la depositación de la Fm. La Montaña o en tiempos más recientes, no es descartable. Es posible que los escarpes puedan estar determinados por la transición entre los distintos y diversos ambientes dentro de la formación La Montaña, y por una erosión diferencial entre los mismos. Sin embargo, probar esta hipótesis requiere de un reconocimiento geológico detallado del área, donde lamentablemente el acceso y los afloramientos resultan ser muy difíciles y escasos.

Asumiendo que la geología (variabilidad de la Formación La Montaña) no cumple un rol en la formación de los escarpes, diferentes evidencias remotas y de terreno sugieren la posibilidad de que los escarpes podrían tener un origen tectónico. Los cauces inmediatamente al este del escarpe occidental tienen alto índice de empinamiento de canal normalizado (*k_{sn}*) que terminan, aguas arriba, en notables *knickpoints* de quiebre de pendiente. Estos rasgos podrían resaltar la progresión aguas arriba de una onda erosiva, posiblemente generada como consecuencia de un último período de movimiento de la falla occidental. La menor evidencia geomorfológica del escarpe oriental podría indicar un episodio de actividad más antiguo de otra falla en este lugar. Adicionalmente, la concentración de remociones en masa (posibles expansiones laterales y deslizamientos erosionados) en el bloque levantado es consistente con el *hanging-wall effect*, sugiriendo una cinemática donde el bloque colgante corresponde al oriental, implicando un movimiento inverso que alzaría la Cordillera Principal.

Los resultados son compatibles con la expresión superficial de una posible falla geológica activa a escala del Cuaternario. Esta posible falla, junto con otras fallas activas probadas o probables detectadas más al norte (fallas Mesamávida, San Ramón y Cariño Botado; Sepúlveda et al., 2018; Vargas et al., 2014; Estay et al., 2023), se alinean bien con la hipótesis de que un extenso cabalgamiento separaría la Depresión Central de la Cordillera Principal a las latitudes de Chile centro-sur (32°30'-37°S) (Maldonado et al., 2021).

Palabras Clave: LiDAR, Empinamiento, Cuaternario, Falla, Knickpoint.

Agradecimientos: Agradecemos al SEREMI MINVU Región del Ñuble por insumos topográficos LiDAR (modificación Plan Regulador de la Comuna de Pinto).

Referencias:

- Estay, J., Pinto, L., Easton, G., De Pascale, G. P., Troncoso, M., Carretier, S., & Forman, S. L. (2023). Active thrust tectonics along the western slope of the Central Andes southernmost Pampean flat-slab segment (~ 33° S, Chile): The Cariño Botado fault system. *Geomorphology*, 108801.
- Gajardo, A. (1981). Hoja Concepción-Chillán, Región del Biobío. Mapas Geológicos Preliminares de Chile, No. 4, escala 1:250.000., Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Maldonado, V., Contreras, M., & Melnick, D. (2021). A comprehensive database of active and potentially-active continental faults in Chile at 1: 25,000 scale. *Scientific data*, 8(1), 20.
- Naranjo, J. A., Gilbert, J., & Sparks, R. S. (2008). Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 114: 28p., 1 mapa escala 1:50:000, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Sepúlveda, T., Cortés, J., Melnick, D. & Cisternas, M. (2018). Neotectónica y paleosismología del cabalgamiento Andino Occidental (WAT) en la región del Maule, Chile Central, 36°S. En: XV Congreso Geológico Chileno, 1(SINT-3), 1 pp. Concepción, Chile.
- Sepúlveda, T. (2019). Neotectónica y paleosismología de la falla Mesamávida: Evidencia de actividad cuaternaria tardía del cabalgamiento Andino Occidental (WAT) en la Región del Maule, Chile Central (36°S). Bachelor thesis, Universidad de Concepción. 118 pp.
- Vargas, G.; Klinger, Y.; Rockwell, T.; Forman, S.; Rebolledo, S.; Baize, S.; Lacassin, R. & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology* 42(12), 1083–1086. ISSN 1943-2682. [doi: 10.1130/G35741.1](https://doi.org/10.1130/G35741.1).

Registro geológico de tsunamis holocenos en el humedal de Carrizal Bajo (~28°S), Atacama Norte de Chile

Maximiliano Kevin Forch Burford¹, Gabriel Easton Vargas¹, Manuel Abad de los Santos²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Rey Juan Carlos, Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Madrid, España

El humedal de Carrizal Bajo, ubicado en dicha localidad costera de la región de Atacama, se encuentra dentro de los pocos humedales septentrionales del país. Su desarrollo se da en condiciones de extrema aridez, con casi nulas precipitaciones anuales, pero con nublados abundantes que se presentan en gran parte del año. En dicho humedal han quedado preservados, en la sucesión sedimentaria holocena, depósitos asociados a diversos eventos tsunamigénicos, intercalados en facies formadas en un contexto sedimentario de baja energía y restringidas principalmente a fangos y limos arenosos, con niveles enriquecidos en materia orgánica, depositados en un sistema de humedal-laguna costero confinado por una barrera litoral arenosa en su zona de desembocadura. Estos eventos tsunamigénicos habrían afectado a las costas del sur del Desierto de Atacama en los últimos miles de años incluyendo tiempos históricos recientes, generando graves daños a localidades costeras y cambios muy significativos del borde litoral. Por medio de esta investigación, a través de un estudio multidisciplinar, se recopila abundante información geomorfológica, sedimentológica, estratigráfica y micropaleontológica de depósitos distintivos interpretados como producto de tsunamis, a partir de los cuales se ha podido reconstruir los efectos principales de las inundaciones marinas sobre la desembocadura de la Quebrada de Carrizal, junto con abordar la procedencia de los sedimentos que constituyen estos depósitos y la edad de los eventos tsunamigénicos que se infieren a partir de ellos. Además, se aporta información relevante sobre las características geoquímicas y contenido de microfauna de los diferentes niveles interpretados como tsunamitas encontrados en el actual humedal y laguna costera. Gracias a dataciones radiocarbono a partir de capas de turba que sobreyacen e infrayacen a niveles de depósitos de paleotsunamis y en conchas de gasterópodos terrestres, se infiere que el humedal de Carrizal Bajo fue afectado por tsunamis de gran magnitud, en torno al siglo VII AC y los siglos VIII/IX, X y XV AD, los que han sido identificados mediante datación directa, indirecta o por correlación con eventos históricos descritos en la región.

Este trabajo deja en evidencia el alto potencial de preservación de registros de tsunamis prehistóricos -o paleotsunamis- en humedales áridos del Desierto de Atacama. Por lo que la investigación contribuye a la ampliación del catálogo de eventos catastróficos de tsunami en tiempos prehistóricos e históricos, generados principalmente, pero no exclusivamente, por el contacto de la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana en el norte de Chile. Por otra parte, se ha logrado un acercamiento a la comprensión y estudio del impacto de estos fenómenos sobre zona costera, resaltando las implicancias para la evaluación del peligro de tsunamis en la región de Atacama.

Palabras Clave: Depósitos de tsunamis, humedal-laguna, Norte de Chile.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT Regular 1201387 "Unveiling multimillennial cycles and super-cycles of tsunamigenic megathrust earthquakes in the major Northern Chile Seismic Gap".

High resolution active tectonic of the northern Chile forearc: progress and new challenges

Gabriel Armando González López¹⁻², Yerko González¹⁻², Luis Astudillo², Paulina Rivera¹⁻², Erik Jensen², Mahesh Shrivastava¹⁻²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres, Avenida Macul 4860, Santiago, Chile

The Coastal Cordillera in northern Chile forms a structural bulge that overlies the down-dip part of the seismogenic zone. Along this cordillera from Arica to Antofagasta, two main structural domains are present: one from Arica city to the Loa River mouth dominated by trench-orthogonal faults, and the other from the Loa River mouth to Taltal characterized by trench-parallel faults belonging to the Atacama Fault System. Both domains shaped the morphology of the Coastal Cordillera, creating mountain fronts up to 500 m high. The trench-orthogonal faults formed during the Cenozoic by shortening parallel to the continental margin. These structures remained active after the Pliocene and locally after the Pleistocene. The trench-parallel faults formed during the Early Cretaceous, were reactivated as normal faults during the Cenozoic, and remained active during the Late Pleistocene. A comprehensive understanding of the link between these structures and megathrust activity is still under debate and has not been precisely defined. In this work, we provide an overview of new outcomes that refine our understanding of the mechanical interaction between megathrust and upper plate faults at active continental margins. As a methodological approach, we used field geology, analytical modeling, and experimental work. Using the last methodology, we tested the fault friction properties of fault rocks. The main findings indicate: 1) trench-orthogonal faults interact mechanically with the megathrust during the pre-seismic stage, propitiating the Mw 8.1 2014 Pisagua earthquake. An Mw 6.3 upper plate earthquake that occurred on September 11, 2020, provides a clear insight into how trench-orthogonal faults can be loaded and reactivated by heterogeneous interplate locking. These two pieces of evidence indicate the complexity of the stress transference between megathrust and upper plate faults. 2) The most recent movements along trench-parallel faults are dominated by centimeter-scale displacements and the propagation of deformation bands. In particular, the occurrence of deformation bands indicates low-energy displacements instead of more energetic earthquakes that dominate the most recent activity of these faults. Optical luminescence dating suggests that during the last 30,000 years, these faults have not generated large earthquakes. In contrast, these faults appear to be dominated by aseismic displacement. 3) Active fault cores of trench subparallel faults are enriched with phyllosilicates reducing their friction coefficient to values lower than 0.47. Frictional stability tests showed that fault cores are dominated by stable sliding at sub-seismic velocities; therefore, they are prone to slip aseismically.

Palabras Clave: forearc tectonics, faults, earthquakes, northern Chile.

Financiamiento: Fondecyt 1200170.

Agradecimientos: This work was financially supported by the grant FONDECYT 1200170. We thank our colleagues of INGV Rome for supporting the frictional experimental work.

The Role of Frictional Strength in the Seismic Behavior of Reactivated Segments of the Atacama Fault System in Northern Chile

Yerko González¹⁻², Gabriel González¹⁻², Erik Jensen¹⁻², Elena Spagnuolo³, Giacomo Pozzi³, Stefano Aretusini³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Via di Vigna Murata 605, Roma, Italia

The trench-parallel Atacama Fault System (AFS) evidences a long history of deformation since the Cretaceous in the Coastal Cordillera of northern Chile. Conspicuous fault scarps are expressed in the topography of this cordillera attesting to the most recent fault activity, characterized by normal faulting. Particularly, between 23°-25°S, metric fault scarps developed in alluvial deposits indicate that AFS has been active at least during the Late Quaternary. Several authors have postulated that this activity is linked to large subduction earthquakes (e.g. Delouis et al., 1998; Cortés et al., 2015). Indeed, in a recent work, Victor et al. (2018) demonstrate that some faults of the AFS accumulate micrometric permanent deformation during the passage of seismic waves of distant earthquakes. This suggests that the AFS represents a weak fault zone of the upper plate. To test this hypothesis we are working to characterize the internal structure of reactivated faults, considering the microtextures and mineralogical composition of the fault cores, and to retrieve with laboratory experiments the frictional properties of reactivated fault cores. For these purposes, we selected and sampled eight fault gouges of the AFS. Samples of the actively deforming part of the faults (powdered rocks, i.e., gouges) were prepared for X-ray diffraction analyses and shear experiments. Mineralogical analysis reveals that five samples contain a high proportion of phyllosilicates (>49.3 wt. %), while in the remaining three samples, the proportion of phyllosilicates ranges from 29 to 35 wt. %. High concentrations of phyllosilicates and intense grain size reduction observed in the fault gouges attest to significant strain accumulation, with processes such as cataclasis, hyper-brecciation, and fluid-driven alteration within the fault cores. The shear experiments were conducted on natural gouge samples under water-saturated conditions using BRAVA biaxial apparatus and SHIVA rotary apparatus (INGV, Rome, Italy).

The samples were tested at normal stresses from 10 to 125 MPa. At low shear velocities ($10 \mu\text{m s}^{-1}$) the tested materials are weak since their frictional strength (μ = ratio of steady-state shear stress to normal stress), $0.15 < \mu < 0.43$, is lower than the value predicted by Byerlee's law ($\mu = 0.6 - 0.85$). The frictional strength decreases with increasing phyllosilicate content due to planar fabric development that favors preferential slip along the phyllosilicate platelets with low shear resistance. At sub seismic velocity ($1 \times 10^{-6} < V < 3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$), fault core materials exhibit velocity-strengthening behavior, making them prone to stable aseismic creep deformation. However, during experiments where shear stress was kept constant while normal stress was progressively reduced, samples displayed abrupt reactivation, indicating a strong control of external forcing conditions. We argue that, at shallow levels of the AFS, the low frictional strength and the velocity-strengthening behavior facilitate aseismic creep during the interseismic period of the subduction earthquakes cycle and even under low-magnitude dynamic stress changes resulting from the propagation of seismic waves. Low seismicity currently observed in the study area (Sippl et al., 2018), and micrometric aseismic displacements recorded by creepmeters installed in the AFS (Victor et al., 2018), are coherent with the frictional properties observed in this study. Abrupt stress changes during the post-seismic period of the 2010 Maule earthquake (Chile, Mw 8.8, Aron et al., 2013) and the 2011 Tōhoku-oki earthquake (Japan, Mw 9.0, Fukushima et al., 2013) triggered earthquakes in the upper plate with magnitudes up to 6.9 Mw at depths ranging from 12 to 20 km. These upper plate faults, analogous to the AFS, leave open the question whether the AFS has the potential to generate large-magnitude earthquakes. Although experiments on the velocity-dependence of friction indicate velocity strengthening at sub seismic velocities, at coseismic velocities (1 ms^{-1}) all fault materials exhibit significant dynamic weakening ($0.12 < \mu < 0.19$) with the propagation of a rupture front. Therefore, fault core materials of the AFS can probably propagate earthquake slip if solicited past the velocity-strengthening regime. To conclude, our work shows that the seismic behavior of the AFS is nominally stable, but sudden changes in the regional stress conditions can facilitate earthquake slip due to the frictional properties of fault materials. The low friction coefficient and high phyllosilicate content measured in the AFS gouges are consistent with the hypothesis that these faults represent a weak fault zone that cannot withstand significant stress and can be reactivated with slight stress field changes.

Keywords: Fault, Friction, Earthquake, Subduction Zone, Forearc Tectonics.

Financing: Our work has been supported by the FONDECYT project 1200170, Chilean government.

Acknowledgments: We thank the working group of the HPHT laboratory at the INGV (Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia), Rome, Italy, for providing us with access to the frictional experiments.

References:

- Aron F., Allmendinger R.W., Cembrano J., González G., Yáñez G., (2013). Permanent fore-arc extension and seismic segmentation: Insights from the 2010 Maule earthquake, Chile: *Journal of Geophysical Research*, v. 118, p. 724–739, [doi:10.1029/2012JB009339](https://doi.org/10.1029/2012JB009339).
- Cortés, J., González, G., Rémy, D., & Martinod, J. (2015). Normal upper plate fault reactivation in northern Chile and the subduction earthquake cycle: From geological observations and static Coulomb Failure Stress (CFS) change. *Tectonophysics*, 639 (April 2016), 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.019>.
- Delouis, B., H. Philip, L. Dorbath, and A. Cisternas (1998). Recent crustal deformation in the Antofagasta region (northern Chile) and the subduction process, *Geophys. J. Int.*, 132(2), 302–338, [doi:10.1046/j.1365-246x.1998.00439.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00439.x).
- Fukushima Y., Takada Y., Hashimoto M., (2013). Complex ruptures of the 11 April 2011 MW 6.6 Iwaki earthquake triggered by the 11 March 2011 MW 9.0 Tohoku earthquake, Japan. *Bull. Seismol Soc Am* 103:1572–1583.
- Sippl, C., Schurr, B., Asch, G., & Kummerow, J. (2018). Seismicity structure of the northern Chile forearc from >100,000 double difference relocated. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 4063–4087. <https://doi.org/10.1002/2017JB015384>.
- Victor, P., Oncken, O., Sobiesiak, M., Kemter, M., Gonzalez, G., & Ziegenhagen, T. (2018). Dynamic triggering of shallow slip on forearc faults constrained by monitoring surface displacement with the IPOC Creepmeter Array. *Earth and Planetary Science Letters*, 502, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.046>.

Architecture, upper crustal extension, and collapse of a continental shelf raised at an accelerated rate during the Quaternary, northern Chile

José González-Alfaro¹, Gabriel Easton¹, Gabriel González², Sylvain Bonvalot³, Germinal Gabalda³, Gabriel Álvarez⁴, Sergio Ruiz⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Université P. Sabatier, GET/UMR5563 (UPS, CNRS, IRD, CNES), Obs, Midi-Pyrénées, Toulouse, France

(4) Universidad de Antofagasta, Departamento de Ingeniería en Geomensura y Geomática, Facultad de Ingeniería, Avenida Universidad de Antofagasta 02800, Antofagasta, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

The coastal forearc of the Central Andes is characterized by the presence of quaternary crustal faults which have contributed to the landscape evolution. The relationship between these structures and the subduction processes is currently under discussion. Researches addressing how the relief and structures present on the coast and continental shelf of the Central Andes forearc are insufficient. Some investigations have focused on the uplift rates of the coastal edge of northern Chile, between 0.1-1.6 m/ka for different late Quaternary ages. Others have addressed slip rates of normal faults present in the Coastal Cordillera of northern Chile, with slip rates between 0.1- 0.6 m/ka with activity during the Late Pleistocene-Late Holocene, and recurrence times on the order of thousands of years. In addition, several works have attempted to relate the activity of these structures to the crustal uplift and endogenous subduction processes. However, works that have carried out a meticulous morphometric investigation of the deformed and intact surface –ideal in the Atacama Desert hyper-arid climatic zone–, relating it to the structures present on it, are practically null. Furthermore, studies that have contributed information of the seabed to complement the geological features observed on the coast, are few and have not focused on characterizing and analyzing the crustal deformation.

In this work, we propose that normal faults located in the upper continental margin act mainly as structures reactivated by crustal uplift, which has been accelerated from the Middle Pleistocene to the Holocene in Mejillones Peninsula, northern Chile. We obtained both surface positioning through differential GPS campaigns and submarine seismic profiles data, and we performed digital elevation models to carry out a surface morphometric analysis. The Mejillones Fault System (MFS) stretches across the seafloor about 30 km, affecting seismic-stratigraphic units and the presence of morphotectonic features corresponding to horst and hemigraben tectonic blocks. In the northern tip point of the MFS, we observed a transition zone with different structural features and an overlap characterized by submarine mega-landslides and fault scarps with accumulated vertical offsets of 300-400 m height, along the continental shelf break slope. These processes occur in a surface that has been subjected to rapid uplift rates, which have accelerated during the Quaternary.

Keywords: Tectonic geomorphology, continental shelf, active normal faults, slip rates, uplift rates.

Acknowledgements: Se agradece al proyecto FONDECYT Regular N° 1201387.

Caracterización geodésica y sismológica de los terremotos corticales de Pichilemu Mw 7.0 y Mw 6.9, 2010: Estudio de las fases inter-, co- y post-sísmicas

Gabriela Herrera Malig¹, Francisco Delgado de la Puente², Sebastián Riquelme¹, Jaime Campos¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Alameda 2002, Santiago, Chile.

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

Los terremotos de subducción producen efectos geológicos permanentes y transientes en la estructura del antearco. Esto se debe al aumento de los esfuerzos estáticos de Coulomb en las fallas, lo que da como resultado una mayor probabilidad de actividad sísmica de la corteza. A escalas de tiempo de horas a días después de un megaterremoto de subducción, estos esfuerzos tienden a desencadenar terremotos en fallas ubicadas en el antearco del sistema de subducción. Esto puede ocurrir incluso en zonas diferentes al área de ruptura principal. El 11 de marzo de 2010 se produjo una secuencia de sismos de este tipo en la zona central de Chile. Dos eventos con magnitudes de Mw 7.0 y Mw 6.9 ocurrieron con 15 minutos de diferencia, ubicados cerca de la ciudad de Pichilemu. Estos ocurrieron en dos fallas normales subparalelas. A pesar de su tamaño, no se detectó evidencia de ruptura superficial. Estos sismos aparentemente fueron gatillados por el terremoto del Maule Mw 8.8 del 27 de febrero de 2010, siendo 2 de las 3 réplicas de mayor magnitud registradas de este evento. Los terremotos de Pichilemu son los eventos más grandes en la corteza continental de América del Sur observados con InSAR desde el comienzo de la geodesia satelital a principios de la década de 1990.

El deslizamiento de fallas se puede medir con InSAR (Interferometría de radar de apertura sintética). Este método utiliza satélites que viajan sobre la superficie terrestre en órbitas polares, los cuales envían ondas que rebotan en la superficie, pudiendo el satélite recibirlas de vuelta. Con 2 imágenes de un mismo punto se puede calcular un mapa de deformación de la superficie en la línea de visión del satélite, que es un interferograma. Esto corresponde a la diferencia de fase de las ondas electromagnéticas que es proporcional al cambio de distancia entre el satélite y la superficie. La importancia de este estudio radica en determinar y caracterizar la forma en que se comporta la falla de Pichilemu en todas las fases del ciclo sísmico, lo que puede ayudar a comprender el papel del terremoto del Maule de 2010 en la acumulación de esfuerzos en la corteza, y cómo se desencadena la posterior liberación de energía. Esto sienta precedentes para futuros estudios de fallas corticales en las zonas de subducción continentales, que pueden contribuir a la determinación de la amenaza sísmica por fallas en otras zonas del país.

En este estudio se caracterizan las diferentes fases del ciclo sísmico, en el periodo de tiempo estudiado, de la falla de Pichilemu utilizando datos InSAR de las misiones ALOS y ENVISAT. Las series temporales de InSAR se calcularon entre 2007 y 2011, donde se cuantificó que no existe acumulación de energía por encima de las incertidumbres de los datos en las fallas durante la fase de bloqueo intersísmico. Se modelaron interferogramas co-sísmicos y post-sísmicos y también se realizó un perfil de deformación acumulada de la falla en función del tiempo que indican cómo se ha deformado la superficie en el tiempo y su magnitud. La deformación post-sísmica duró seis meses y resultó en una deformación de 0,16 m, que es menos de la cuarta parte de la deformación de la fase co-sísmica, que registró una deformación superficial máxima de 0,67-0,62 m. Finalmente, se invirtieron los datos de InSAR para los parámetros de falla de mejor ajuste, obteniendo como resultados una magnitud de 6,95 Mw, 135 de rumbo, 57 de buzamiento y un deslizamiento de 2,7 m. Además, una inversión conjunta de InSAR, gps y datos telesísmicos para determinar la distribución del deslizamiento de fallas. Se compararon los hallazgos con la acumulación de deformación permanente del Holoceno registrada por terrazas marinas levantadas en el pie de la falla, y con fallas normales en otros lugares.

Palabras Clave: fallas, terremoto, subducción, deformación, insar.

Análisis geomorfológico y estructural de abanicos aluviales plio-pleistocenos en el piedemonte andino occidental (37°S)

Roberto Larregla Maldonado¹, Daniel Melnick d'Etigny¹, Mauricio Espinoza Vargas²

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de ciencias de la tierra, Facultad de ciencias, Av. Rector Eduardo Morales Miranda 23, Valdivia, Chile.

(2) Universidad de Concepción, Departamento de ciencias de la tierra, Facultad de ciencias químicas, Las Heras 915, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile.

El piedemonte andino a los 37°S se encuentra cubierto por abanicos aluviales coalescentes de la Fm. Malleco de edad Pliocena a Pleistocena que se apoyan sobre la vertiente occidental del orógeno andino. La observación mediante relieves sombreados de alta resolución creados a partir de datos obtenidos por un sensor LiDAR aerotransportado de la superficie de tres abanicos aluviales nombrados durante este trabajo como San Ignacio, Zapallar y Pemuco, revela un proceso de deformación a gran escala nunca antes descrito en el antearco de Chile centro-sur. Se observan una serie de lineamientos que afectan pervasivamente las tres superficies aluviales cuyo origen es hasta ahora desconocido. La metodología diseñada para este trabajo se enfocó en comprobar o descartar un origen tectónico relacionado al sistema de fallas del Cabalgamiento Andino Occidental de orientación NNE-SSO para esta deformación, a través del mapeo y análisis estadístico de la red de trazas observadas, el análisis morfométrico de la red hídrica presente sobre los abanicos, la elaboración de perfiles de radar utilizando un GPR, la determinación del *strain* experimentado por las superficies y la integración de la información en un modelo *forward*. Desde un punto de vista topológico es probable que la red de estructuras mapeadas haya atravesado una evolución sincrónica mientras que el acercamiento estadístico al problema sugiere en base a su geometría una génesis tectónica común para estas. Sumado a esto, el análisis morfométrico junto con las evidencias de campo sustentan el desarrollo de un sistema extensional de fracturas y fallas de orientación preferencial NNE-SSO con actividad neotectónica holocena probada a lo largo de un área de ~1,300 km². Como resultado del análisis del *strain* unidireccional asociado a la deformación (producto de la apertura de las grietas y fallas extensionales) se determinó de manera consistente un valor de *strain* u elongamiento (ϵ) promedio de $14,4 \pm 4,9$ % para las tres superficies estudiadas reforzando la idea de un origen tectónico común para la deformación. Finalmente, considerando una configuración geológica basada en estudios previos se integraron los resultados obtenidos en un modelo *forward* capaz de reproducir la deformación observada en las superficies aluviales. Tomando en cuenta el emplazamiento de los abanicos sobre la vertiente occidental del orógeno andino a los 37°S es que en concordancia con Radic, (2010) se propone el desarrollo de una falla ciega de atajo perteneciente al sistema de fallas del Cabalgamiento Andino Occidental, propagándose desde el borde occidental de la cuenca invertida de Cura-Mallín hacia la base de los abanicos aluviales de la Formación Malleco, la cual es nombrada por este trabajo como Falla Pinto.

Keywords: Neotectónica, LiDAR, Falla, Deformación

Financing: Núcleo Mile

Interseismic and aseismic deformation of the Magallanes-Fagnano Fault constrained by InSAR

Pablo León-Ibáñez¹, Francisco Delgado¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

Reid's Elastic Rebound Theory (Reid, 1910) has dominated the study of earthquakes and fault rupture for over a century. However, the last few decades of increasingly accurate geodetic observations, have shown much greater complexity on strain accumulation and release. Nowadays, deformation regarding crustal faults is recognized as a continuum ranging from a locked structure that can rupture seismically or aseismically, to creeping faults where locking becomes negligible (Jolivet and Frank, 2020). With this premise in mind, we study the Magallanes-Fagnano Fault (MFF), in order to understand its segmentation and seismic potential.

Roughly located at the southern end of Tierra del Fuego and the Magellan Strait, it constitutes the inland expression of the sinistral strike-slip boundary between the South America and Scotia Plates (Klepeis, 1994). GNSS data shows fault-parallel slip rates of 6-7 mm/year, and its last major rupture generated two >7M earthquakes on December 17, 1949 (Mendoza et al., 2022; references therein). This plate boundary has been overlooked by worldwide and national catalogs of hazardous faults (e.g., Molnar and Dayem, 2010), likely due to the limited robust data on the majority of the structure. This underestimation occurs despite new neotectonic, seismological and geodetic observations that highlight its active character (e.g., Roy et al., 2020), making it the best suited crustal fault in Chile to study the earthquake cycle on historical to Holocene time scales.

In the context of a highly inaccessible structure, particularly on the Chilean side, InSAR constitutes the best alternative to broadly study it. It provides economically effective means, years of available open-access data, the best spatial resolution and enough temporal resolution to study the interseismic (and potentially aseismic) behavior of the MFF.

Using Sentinel-1 SAR images spanning 2014 through 2022, we analyze the intricacies of performing SAR interferometry at this latitude, and present preliminary results of time-series analysis, aimed to assess cumulative slip, presenting a first detailed velocity map for the fault system. This work poses a significant contribution to close the gap on geodetic data. Furthermore, it shows the potential of Sentinel-1 and other SAR data in remote subpolar areas, where it is commonly dismissed due to loss of coherence that prevents fully automated processing.

Keywords: Magallanes-Fagnano Fault, InSAR, Satellite Geodesy, Seismic Hazard, Active Tectonics

Financing: This project is financed by Fondecyt Iniciación 11220513 (FD), a National PhD Fellowship (Conicyt) and an initial internal PhD grant (U. de Chile).

References:

- Jolivet, R. & Frank, W. B. (2020). The transient and intermittent nature of slow slip. *AGU Advances*, 1(1), e2019AV000126. <https://doi.org/10.1029/2019AV000126>
- Klepeis, K. A. (1994). The Magallanes and Deseado fault zones: major segments of the South American-Scotia transform plate boundary in southernmost South America, Tierra del Fuego. *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), 22001–22014. <https://doi.org/10.1029/94jb01749>
- Mendoza, L. P. O., Richter, A., Mardewald, E. R., Hormaechea, J. L., Connon, G., Scheinert, M., et al. (2022). Horizontal and vertical deformation rates linked to the Magallanes-Fagnano Fault, Tierra del Fuego: Reconciling geological and geodetic observations by modeling the current seismic cycle. *Tectonics*, 41, e2021TC006801. <https://doi.org/10.1029/2021TC006801>
- Molnar, P., & Dayem, K. E. (2010). Major intracontinental strike-slip faults and contrasts in lithospheric strength. *Geosphere*, 6(4), 444-467. <https://doi.org/10.1130/GES00519.1>
- Reid, H.F. (1910). The California Earthquake of April 18, 1906. Volume II. The Mechanics of the Earthquake. Washington DC: Carnegie Institution of Washington, Publication No. 87, 192 p.
- Roy, S., Vassallo, R., Martinod, J., Ghiglione, M. C., Sue, C., & Allemand, P. (2020). Co-seismic deformation and post-glacial slip rate along the Magallanes-Fagnano fault, Tierra Del Fuego, Argentina. *Terra Nova*, 32(1), 1-10. <https://doi.org/10.1111/ter.12430>

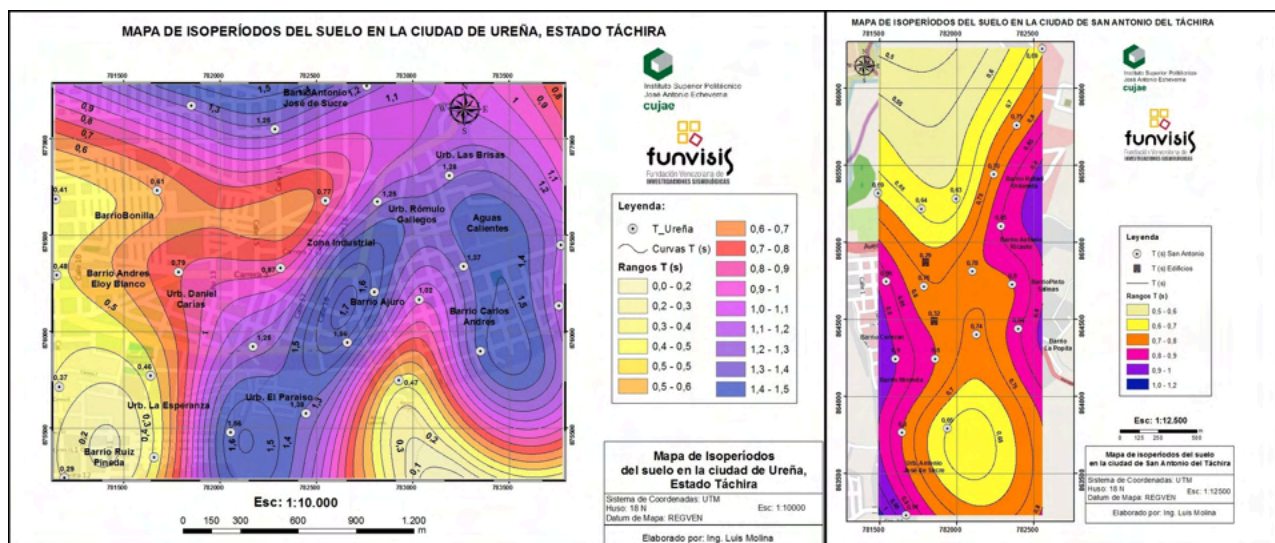
Caracterización sísmica del suelo aplicando el Método de Relación Espectral H/V en las ciudades de San Antonio del Táchira y Ureña, Venezuela

Luis A Molina León¹, Víctor Rocabado², Michael Schmitz²

(1) Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida "Kléber Ramírez"; Tecnología, Programa Nacional de Formación en Geociencia (PNF en Geociencia), Ejido, Estado Mérida, Venezuela

(2) Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Geofísica, Av. Guaicaipuro con calle Tiuna final de la, Calle Mara, Caracas 1070, Miranda, Venezuela

En Venezuela se considera que el 80% de la población habita en regiones sísmicamente activas, donde se han registrado diversos terremotos destructores y de gran magnitud. El Estado Táchira, según el Mapa de Zonificación Sísmica con fines de Ingeniería (FUNVISIS, 2014) es una de las regiones influenciadas por el sistema de fallas de Boconó donde los principales centros poblados se encuentran en zonas de elevado peligro sísmico (Zona Sísmica: 5, A0: 0,30g). En tal sentido, se iniciaron los proyectos con fines de microzonificación sísmica en el Estado Táchira por parte de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) en colaboración con la maestría de Geofísica Aplicada del convenio (MPPEUCT-CUJAE), dentro de los cuales, se presenta el siguiente trabajo de investigación cuyo objetivo esencial es caracterizar sísmicamente el suelo en las ciudades de San Antonio del Táchira y Ureña mediante mediciones de ruido ambiental aplicando el método de relación espectral H/V (Método de Nakamura). Para cumplir con dicho objetivo, se empleó un sismógrafo y un sensor Reftek de tres componentes con un tiempo de grabación de 20 minutos por estación, la distribución y ubicación de estaciones de medición de ruido ambiental se establecieron de acuerdo a la extensión de cada ciudad. Posterior a la adquisición de datos se realizó el procesamiento y se determinaron los valores de período fundamental para cada una de las localidades mencionadas. Los siguientes pasos comprenden la estimación del espesor de sedimentos para las ciudades estudiadas considerando los valores de velocidad de onda de corte para los primeros 30 m (V_{s30}) y el valor de V_{sinf} para el estrato más profundo, dada la relación entre período y profundidad que genera estimaciones más exactas de espesor de sedimentos. Obteniendo como resultados períodos fundamentales del suelo para la ciudad de San Antonio del Táchira entre 0,63 y 0,91 s mientras que en la ciudad Ureña los valores período fundamental oscilaron entre 0,29 y 1,56 s. En el caso de los espesores de sedimentos estimados para la ciudad de San Antonio del Táchira se encuentran entre 72,74 y 121,22 m con los mayores espesores hacia la zona este y suroeste de la ciudad, mientras que los espesores de sedimentos en la ciudad de Ureña se delimitan entre 23,98 y 241,45 m con los mayores espesores ubicados hacia las zonas sur, central y este de la ciudad, indicando una relación de correspondencia entre los períodos fundamentales del suelo y los espesores estimados.



Palabras clave: Microzonificación sísmica, Período fundamental, Ruido ambiental, Relación espectral H/V

Financiamiento: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

Agradecimientos: A la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por el gran apoyo brindado para el desarrollo del presente estudio.

Registro geológico de paleotsunamis holocenos en la costa de La Ligua y Papudo, zona central de Chile

Ismael Murillo Rogers¹⁻², Gabriel Easton Vargas¹, Daniela Villela², Max Forch¹, Luciano Duhalde⁵, Silvana Valls⁴, José González-Alfaro¹, Cristina Ortega³, Daniel Hernández⁶

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) SERNAGEOMIN, Santa María 104, Providencia, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Ignacio Carrera Pinto 1045, Santiago, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Portugal 84, Santiago, Chile

(6) University of Florida, Department of Anthropology, College of Liberal Arts and Sciences, Turlington Hall, Gainesville, EUA

Chile ha sido afectado históricamente por mega-terremotos, asociados a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. En la zona central, entre los 31°S y los 34°S, el último gran evento de este tipo ($M_w > 9$) ocurrió el año 1730 ($M_w \sim 9,1-9,3$), y abarcó una zona de ruptura de entre 600 y 800 km, entre las ciudades de Coquimbo y Concepción, a lo largo del contacto entre las placas tectónicas. Dicho evento se asocia a un tsunami que causó destrucción en una extensión de más de mil kilómetros de costa, siendo observado en casi todo el Pacífico oriental. Otros grandes terremotos en esta área de ruptura han sido registrados en documentos históricos en los años 1822, 1880, 1906, 1943, 1971, 1985 y 2015 (Madariaga, 2018). Sin embargo, estos terremotos podrían ser considerados como eventos menores dentro de un superciclo sísmico ($M_w > 8,5$; Goldfinger *et al.*, 2013), y se han asociado a tsunamis de menor escala. Lo anterior ha llevado a algunos autores a sugerir que existe un *tsunami gap* en este segmento (Easton *et al.*, 2022), en referencia a una zona costera que no ha sido afectada recientemente por un gran tsunami, originado por un terremoto en el margen de subducción frente a la misma región.

A partir del registro histórico disponible, se ha considerado al terremoto de 1730 como el “peor escenario” en las cartas de inundación por tsunami elaboradas por el SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile) en la zona central de Chile. Sin embargo, los registros históricos o instrumentales limitan la perspectiva de estos fenómenos a un rango de tiempo de decenas o cientos de años, y no permiten comprender ni dimensionar la magnitud o la recurrencia de estos eventos en periodos más largos. En ese contexto, el estudio del registro geológico de paleotsunamis tiene el potencial de aportar evidencias prehistóricas sobre estos fenómenos y, en consecuencia, contribuir en la evaluación del riesgo de desastre asociado a estos eventos en el futuro.

En la última década, posterior a los terremotos del 2010 en la Región del Maule ($M_w 8,8$) y 2015 en Illapel ($M_w 8,3$) ha habido un creciente interés por estudiar el registro geológico de depósitos de tsunami en la costa de Chile (Cisternas *et al.*, 2017; Dura *et al.*, 2015; Easton *et al.*, 2022; León *et al.*, 2019). Sin embargo, en el segmento centro-norte de Chile, este tipo de estudios aún son escasos. De acuerdo con Dura *et al.* (2015), el paleotsunami holoceno más joven registrado en las costas de la bahía de Quinteros (zona central) tendría al menos 3.000 años. Lo anterior podría sugerir que en ese sector el registro de paleotsunamis más recientes (< 3.000 años) está incompleto, y se requieren nuevos estudios geológicos para reconstruir la ocurrencia de antiguos tsunamis en Chile Central.

En este estudio se presentan los primeros avances en la investigación sobre el registro geológico de paleotsunamis en la localidad de Longotoma, junto a la desembocadura del río La Ligua y Petorca, donde se reconocen ambientes sedimentarios con condiciones favorables para la generación y preservación de depósitos originados por estos fenómenos, tales como estuarios, humedales, lagunas, y llanuras de inundación a baja altura con respecto al nivel del mar. En total se excavaron 15 calicatas, las que permitieron realizar un levantamiento estratigráfico y sedimentológico de detalle de la llanura de inundación del río La Ligua, cerca de su desembocadura. Se reconocieron sucesiones conformadas por capas centimétricas de arenas y limo muy bien seleccionadas, ricas en restos biológicos marinos, intercaladas con capas centimétricas de arcillas y turbas, ricas en materia orgánica y restos arqueológicos. Se reconoció además la presencia de capas de arena ricas en restos de foraminíferos bentónicos, como la especie *Amonia beccarii*, típicos de ambientes intermareales, además de ostrácodos *Xestoleberis chilensis*, provenientes de dicha zona litoral.

A partir de un estudio fotogramétrico de detalle de la zona, se reconocieron abanicos de sobrepaso (*overwash fan*) al este de las barras de las dunas litorales, junto con canales erosivos orientados hacia el mar y desconectados de los principales patrones de drenaje fluvial. A partir de una datación radiocarbono, se obtuvo una edad calibrada de 1401-1451 cal AD, que representa una edad máxima para un posible tsunami registrado en las calicatas estudiadas. Las evidencias sedimentológicas, geomorfológicas, biológicas, arqueológicas y geocronológicas obtenidas hasta ahora permiten suponer que, probablemente, en la zona existe registro geológico de al menos dos tsunamis antiguos (o paleotsunamis) del Holoceno tardío.

Palabras clave: Megaterremotos, Geoarqueología, Tsunamis

Financiamiento: FONDECYT 1201387SERNAGEOMIN

Agradecimientos: Agradezco a Eugenia Fonseca, Juan Bustamante, Jorge Parra y Juan Lecaros de SERNAGEOMIN; al PNG de SERNAGEOMIN y al FONDECYT 1201387 por su apoyo y financiamiento respectivamente.

References:

- Cisternas, M., Garrett, E., Wesson, R., Dura, T., & Ely, L. L. (2017). Unusual geologic evidence of coeval seismic shaking and tsunamis shows variability in earthquake size and recurrence in the area of the giant 1960 Chile earthquake. *Marine Geology*, 385, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.007>.

- DePaolis, J. M., Dura, T., MacInnes, B., Ely, L. L., Cisternas, M., Carvajal, M., Tang, H., Fritz, H. M., Mizobe, C., Wesson, R. L., Figueroa, G., Brennan, N., Horton, B. P., Pilarczyk, J. E., Corbett, D. R., Gill, B. C., & Weiss, R. (2021). Stratigraphic evidence of two historical tsunamis on the semi-arid coast of north-central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 266, 107052. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107052>.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B. P., Ely, L. L., Nelson, A. R., Wesson, R. L., & Pilarczyk, J. E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 113, 93–111. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.015>.
- Easton, G., González-Alfaro, J., Villalobos, A., Álvarez, G., Melgar, D., Ruiz, S., Sepúlveda, B., Escobar, M., León, T., Báez, J. C., Izquierdo, T., Forch, M., & Abad, M. (2022). Complex Rupture of the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake and Prehistoric Events in the Central Chile Tsunami Gap. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220210283>.
- Goldfinger, C., Ikeda, Y., Yeats, R. S., & Ren, J. (2013). Superquakes and supercycles. *Seismological Research Letters*, 84(1), 24–32. <https://doi.org/10.1785/0220110135>.
- León, T., Vargas, G., Salazar, D., Goff, J., Guendon, J. L., Andrade, P., & Alvarez, G. (2019). Geo-archaeological records of large Holocene tsunamis along the hyperarid coastal Atacama Desert in the major northern Chile seismic gap. *Quaternary Science Reviews*, 220, 335–358. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.07.038>

Late Quaternary-Holocene uplift of the Western Andean Front in Central Chile (36°S)

Lucas Navarro Navarro¹, Joaquín Cortés Aranda¹, Ricardo Aguilera¹, Daniel Melnick²

(1) Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile.

(2) Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.

The Mesamávida Fault (MeF) is a seismogenic fault of the Western Andean Front (WAF) in Central Chile at 36°S (e.g., Cortés-Aranda et al., 2022). Studies including paleoseismic trenches, paleoseismic analysis of the fault scarp, morphological dating, and instrumental seismicity, allows considering this fault as a hazardous structure capable for producing Mw 6.1 to 6.7 earthquakes (e.g., Cortés-Aranda et al., 2022 and this issue). Even if it is known that paleoearthquakes of these magnitudes have occurred during the Holocene, no information concerning slip rates for this timespan have been determined; this is due to the absence of suitable dating materials in the deformed Holocene markers. In this contribution, to acquire an idea about the slip rates on the MeF, we focus on the fluvial terraces of the Achibueno River, a west trending river dissecting this fault, to derive incision rates that may be, at least partially, related to deformation rates. To do so, we first perform a semi-automated mapping of the fluvial terraces on a 1 m LIDAR DTM with the ArcGIS plugin TeRex (Stout and Belmont, 2014); this mapping is then validated with field observations and transversal topographic profiles. Then, OSL samples were collected from some of the terrace deposits. With this methodological approach, we have determined that 7 levels (Q1 to Q7, from younger to older) of terraces can be distinguished along the river flanks; mostly, they correspond to straight terraces veneered with alluvial gravels and interbedded sand levels. From sand levels in terraces Qt7, Qt4, and Qt1, we collected OSL samples that resulted, respectively, in ca. 43 ka, ca. 21-23 ka, and 6.6 ka. A detailed analysis is being carried out to derive incision rates along the trend of the Achibueno River and discuss their significance in terms of the Late Quaternary to Holocene uplift rates conducted by the MeF. Preliminary estimates suggest that, for the Holocene timespan (last ca. 6.6 ka), the MeF accommodates ca. 0.3 m/ka.

Keywords: Western Andean Front, Mesamávida Fault, Late Quaternary to Holocene deformation rates

Financing: Fondecyt Iniciación 11180509, Millennium Nucleus CYCLO

References:

- Stout, J. C., & Belmont, P. (2014). TerEx Toolbox for semi-automated selection of fluvial terrace and floodplain features from lidar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(5), 569-580.
- Cortés-Aranda, J.; Sepúlveda, T.; Aguilera, R.; Arriagada, D.; Vega, A.; Melnick, D.; Tassara, A.; Riedel, M.; Luppi, M.; Espinoza, M.; Oviedo, A. (2022). The Mesamávida Fault: evidence for a seismogenic fault in the Western Andean Front (WAF) at 36°S, Central Chile Andes. In *actas VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*.

Morphotectonic Features and Age Constraints in the Chilean Andes: Unraveling Deformation along the Western Andean Front between Perquillauquen and Ñuble rivers

Jorge Adrián Oviedo Reyes¹, Joaquín Cortes-Aranda¹, Alfonso Fernández¹⁻², José Vicente Perez-Peña³,
Laura Alejandra Flores Palma⁴

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Concepción, Chile

(3) Universidad de Granada, Departamento de Geodinámica, Granada, España

(4) Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Müncheberg, Germany

An example of deformation along active mountain fronts is the Western Andean Front (WAF) in the Chilean Andes (~17°S to 39°S), a well-constrained morphological feature between two main physiographic units: the Central Depression (or Central Valley) and the Principal Cordillera. A previous study between 35°S and 37°S demonstrates the presence of two tectonically active mountain fronts using morphometric analysis: The first corresponds to a Range Bounding Fault (RBF) with a younger fault scarp (Cachapoal Fault) and Internal Mountain Front (IMF, San Fabian Fault). Building upon this knowledge, our research aims to obtain age constraints for fault scarps and terraces between Perquillauquen and Ñuble rivers to differentiate these findings further. Additionally, we investigated the regional neotectonic imprint of the WAF between these latitudes and established a preliminary understanding of the faulting style using striae data. As a result, our analysis includes ten optically stimulated luminescence (OSL) ages from various Quaternary terrace levels, including linear scarps. Through the geomorphic mapping, we detailed different terrace levels and morphotectonic features (e.g., hanging valleys, deflected rivers, rectilinear ridges, among others) to support the findings and highlight the significant neotectonic activity in the southern central Andes of Chile. Our findings indicate that the study area presents a well-established piedmont foreland that is deformed between the two mountain fronts, showing a constant evolution according to the regional structural framework. The age data suggest a front migration due to active tectonics during Upper Pleistocene, and the recent deformation is accumulated in a ~70 Km of fault scarp dating $\sim 25,700 \pm 1,800$ years. We used the age data we estimated at the RBF for a slip rate of approximately 2.11 ± 0.150 mm/yr. This research contributes to a better understanding of the region's geological dynamics and provides valuable insights into the landscape evolution in the area.

Keywords: Morphotectonic, OSL, Structural Style, Western Andean Front

Financing: Recursos Udec - Financiamiento propio

Acknowledgments: Los autores agradecen al programa de ANID - becas doctorado nacional 2019 por el soporte para llevar a cabo la tesis de doctorado.

Sistema de fallas Cariño Botado: Tectónica compresional activa a lo largo en el borde occidental de la Cordillera Principal de Los Andes (~33°S, Chile)

Luisa Pinto Lincoñir¹, José Estay¹⁻², Gabriel Easton¹, Gregory De Pascale³, Miguel Troncoso¹, Sebastien Carretier⁴, Steven Forman⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Plaza Ercilla #803, Santiago Centro, Santiago, Chile

(2) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre #194, Oficina 61, Providencia, Santiago, Chile

(3) University of Iceland, Institute of Earth Sciences, Reykjavik #102, Iceland

(4) University of Toulouse, CNRS, IRD, GET, UPS, 31400, Toulouse, France

(5) Baylor University, Department of Geology, One Bear Place #97354, Waco, Texas 76798-7354, USA

A lo largo de la vertiente occidental de los Andes, en la parte más austral del segmento de subducción del *flat-slab* Pampeano (~33°S), se encuentran fallas inversas compresionales cuaternarias de vergencia oeste, desarrolladas dentro del Sistema Estructural Pocuro. Estas fallas constituyen el sistema de fallas Cariño Botado (CBF). La falla principal de este sistema monta rocas del Cenozoico tardío (Fm. Abanico) sobre depósitos cuaternarios de abanicos aluviales. Esta falla se expone con un manteo promedio de 40°E y produce un *offset* vertical de ~3 m ~30 m. La alineación de los afloramientos de la falla, los puntos de inflexión de las quebradas y ríos, junto con los depósitos aluviales y fluviales afectados por la falla, permiten reconocer que su actividad más reciente tiene una traza de entre ~5 y 15 km. Dataciones por OSL a partir de muestras tomadas de depósitos de abanicos aluviales afectados y no afectados por la falla, arrojaron edades entre ~2,5 y ~9,0 ka, lo que respalda su actividad holocena, junto con ~5 m de desplazamiento de falla en los últimos ~9 ka. La edad cuaternaria (~1 Ma, U-Pb) de circones detríticos en depósitos aluviales aterrazados indica que la actividad del CBF podría haber comenzado antes de ~1 Ma, produciendo un levantamiento acumulado del bloque colgante de ~130 m, en este último periodo. A partir de la relación entre la incisión del río Aconcagua y Estero San Francisco, la distribución de terrazas fluviales, la variación en sinuosidad y potencia de corriente, y la ubicación de las trazas de fallas, sugerimos que el levantamiento tectónico como producto de la actividad de la CBF controla la incisión fluvial en el bloque colgante desde al menos los ~1 Ma hasta la actualidad. Basándonos en la longitud conocida de la falla principal del sistema CBF, deslizamiento y relaciones de escala de los terremotos, sugerimos que esta falla ha sido capaz de generar terremotos de Mw ~7,5. Por lo tanto, se concluye que el sistema CBF es activo (desde al menos ~1 Ma hasta la actualidad) y comparte similitudes geométricas, estructurales y de cronología de ruptura sísmica con el sistema de fallas de San Ramón, este último ubicado aproximadamente a ~50 km al sur a lo largo del borde oriental de la cuenca de Santiago. La potencial activación del CBF representa un riesgo sísmico para la población e infraestructura, tal como el sistema de falla San Ramón. Ambos sistemas de falla se ubican a los pies del frente cordillerano que limita el borde occidental de la Cordillera Principal de los Andes, a lo largo de un mismo sistema morfo-estructural de orientación norte-sur, por lo cual no es posible descartar una relación estructural y temporal en cuanto a grandes terremotos con ruptura sísmica superficial y, por lo tanto, siguen siendo objetivos relevantes de investigación.

Keywords: Flat-slab pampeano, Sistema de Fallas Cariño Botado, Tectónica activa, Peligro sísmico

Financing: Este estudio fue apoyado principalmente por el Proyecto Fondecyt 1200871 (L. Pinto) y en segundo lugar por el Proyecto Fondecyt 11160038 (G. de Pascale) y la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile (ONEMI) bajo resolución N° 41, 20 de junio de 2016 (Monitoreo sísmico y potencial sismogénico de la Falla de San Ramón). Reconocemos el financiamiento del Proyecto Fondecyt 1090165 (L. Pinto), a partir del cual se realizaron las primeras observaciones de la falla Cariño Botado.

Acknowledgments: Queremos agradecer a muchas personas por su invaluable ayuda con esta investigación, en especial a la comunidad de Cariño Botado y Llano Norte por su hospitalidad al trabajar en la región.

References:

- Estay, J., Pinto, L., Easton, G., De Pascale, G.P., Troncoso, M., Carretier, S., Forman, S.L., (en prensa). Active thrust tectonics along the western slope of the Central Andes southernmost Pampean flat-slab segment (~33°S, Chile): The Cariño Botado fault system. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108801>.

Sistema de Fallas Cariño Botado: Aplicación geoestadística y geomorfométrica al análisis neotectónico en el borde oriental de la Depresión de Los Andes - San Felipe, Chile central (~32,45'S)

Javiera Quezada Verdugo¹, Luisa Pinto Lincoñir¹, José Estay Herrera²

(1) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(2) Xterrae geología, Hernando de Aguirre 194, Of. 61, Providencia, Chile.

En los últimos años se ha definido la existencia del Sistema de Fallas Cariño Botado (SFCB) en el borde oriental de la Depresión de Los Andes - San Felipe (~32,45'S), correspondiendo a esta latitud al borde occidental de la Cordillera Principal chilena. Es un sistema de rumbo principal N-S, de entre ~7,5 - 15 km de longitud, cinemática inversa, vergencia oeste y con evidencias de actividad neotectónica cuaternaria (Troncoso, 2014; Estay, 2019; Estay et al., 2023).

Los estudios recientes se han enfocado en delimitar las estructuras principales y comprobar su actividad neotectónica (Estay, 2019; Said, 2021; Canales, 2022; Urrejola, 2022), para establecer sus implicancias para la comprensión tectonoestratigráfica local, como para el peligro sísmico subsecuente que podría potencialmente ocasionar (Estay et al., 2023).

En este contexto, este trabajo se centró en evidenciar estructuras en superficie mediante el estudio de métodos estadísticos y morfométricos, aplicados sobre un DEM de alta resolución del área (4 m/pixel, Estay, 2019), permitiendo identificar marcadores geomorfológicos. En específico, se implementó el método desarrollado por Subiela et al., (2019) que aplica el estadístico Getis-Ord para detectar knickpoints en superficie a distintos intervalos de confianza (sobre 90%). Esta información se enlazó a los resultados de Stream Power, índice de sinuosidad y gradiente, estudiados en la red de drenaje, y a los knickpoints observados en torno a SFCB.

Los resultados preliminares permitieron confeccionar un mapa de precisión (1:10.000), estableciendo la disposición de las estructuras y disminuyendo así las incertezas con respecto a los segmentos de fallas y/o lineamientos inferidos previamente en el área. Estos resultados permitirán comprender más precisamente la configuración del Sistema de Fallas Cariño Botado (SFCB) de fallas sintéticas, inversas y de vergencia oeste, registradas en la morfología local.

Proponemos la sistematización de este método estadístico aplicado a DEM de alta resolución, entendiéndolo como una herramienta matemática objetiva y de bajo costo que permite generar aproximaciones de primer orden y que son complemento al trabajo de campo.

Palabras claves: Sistema de Fallas Cariño Botado, knickpoint, Getis-Ord, morfometría

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto).

Acknowledgments: Nuestros agradecimientos a los geólogos y compañeros de campo que participaron en este trabajo: Javiera Cortés, Abigail Jackson-Gain, Kimberly Demierres, José Moreno, Miguel García y Alonso Canales.

Referencias:

- Canales, A., 2022. Análisis estratigráfico de las unidades meso-cenozoicas entre el valle de Aconcagua y el estero San Francisco: Implicancias para el alzamiento de la Cordillera Principal de Chile central (32°48'S). Tesis de pregrado (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 91 p.
- Estay, J., 2019. Tectónica activa en el borde occidental de la Cordillera Principal de Chile Central (29°-36°S). Tesis de Magister (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 195 p.
- Estay, J., Pinto, L., Easton, G., De Pascale, G.P., Troncoso, M., Carretier, S., Forman, S.L., 2023. Active thrust tectonics along the western slope of the Central Andes southernmost Pampean flat-slab segment (~ 33°S, Chile): The Cariño Botado fault system. *Geomorphology* 437, 108801. ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108801>.
- Said, A., 2021. Definición del límite entre las unidades mesozoicas y cenozoicas en la vertiente occidental de los Andes Centrales entre los 33°S y su relación con la zona de Falla Pucuro. Tesis de pregrado (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 110 p.
- Subiela, G., Guináu i Sellés, M., Galve, J., 2019. Idoneidad del índice SL para la identificación semi-automática de movimientos en masa que afectan a la red de drenaje. *Boletín Geológico y Minero*, 130(3), 465–487.
- Troncoso, M., 2014. Evidencia geomorfológica de neotectónica en el borde oriental de la depresión Los Andes-San Felipe, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso. Tesis de Magister (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 288 p.
- Urrejola-Sanhueza, J., 2022. Análisis estructural mediante magnetotélúrica del Sistema de Fallas Pucuro entre el estero San Francisco y el río Aconcagua, V Región. Tesis de pregrado (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 106 pp.

Neotectónica en la costa de Chile Central (33°S): hallazgos geológicos y aplicaciones geofísicas para la evaluación del potencial sísmogénico

Natalia Sofía Sepúlveda Díaz¹⁻², Carlos Marquardt¹, Cecilia Donoso², Javiera Salazar², María Pía Rodríguez Montecinos³⁻⁴

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural, Ingeniería, Avenida Vicuña Maquena 1234, San Joaquín, Santiago de Chile, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Aplicada, Avenida Santa María 0104, Providencia, Chile

(3) Universidad de Atacama, Geología, Ingeniería, Copayapu 485, Copiapó, Chile

(4) Universidad Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, República 237, Santiago, Chile

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo debido a que se encuentra en el contacto tectónico entre las placas de Nazca y Sudamericana. Aquí no solo se producen grandes terremotos de subducción, sino que también zonas de deformación en la corteza continental, como se registró durante el terremoto del Maule ocurrido el 27 de febrero de 2010 (e.g., Moreno et al., 2010; Aron et al., 2014; Arriagada et al., 2010). La neotectónica a lo largo de la costa se evidencia por la actividad de fallas y por el alzamiento tectónico del continente durante el cuaternario (e.g. Marquardt et al., 2004). En este trabajo se realizan estudios de geología estructural en un segmento de la Cordillera de la Costa de Chile de Chile central localizada en los 33°S, donde se han descrito fallas NO-SE y NE-SO con potenciales reactivaciones durante el Cuaternario (Lavenue y Encinas, 2005; Cembrano et al., 2007; Santibáñez et al., 2019). Las fallas corticales en la placa Sudamericana tienen tasas de recurrencia bajas, del orden de un terremoto cortical cada mil años, y generalmente producen sismicidad con magnitud máximas de 7,5 Mw (Santibáñez et al., 2019). Si bien las magnitudes máximas de las fallas corticales son inferiores a las medidas en terremotos de interplaca, tienen la capacidad de causar gran destrucción a escala local, debido a la menor profundidad de sus hipocentros (e.g., terremoto de Chichi, 1999). La naturaleza, las tasas de recurrencia, los desplazamientos y el potencial sísmogénico de las fallas corticales en Chile son materia de estudios en curso. Determinar estos parámetros de la deformación frágil a lo largo de zonas costeras cercanas a la fosa es un problema desde el punto de vista del peligro sísmico de primer orden. Para avanzar en esta línea, este estudio tiene como objetivo general investigar el potencial sísmogénico de las estructuras que afectan a unidades cuaternarias en los sectores cercanos a San Antonio y San Sebastián, región de Valparaíso. Las estructuras han sido cartografiadas y caracterizadas para estimar los siguientes parámetros sísmicos: desplazamiento máximo, desplazamiento mínimo y largo de ruptura superficial de fallas; para su evaluación de peligro sísmico de tipo determinístico. La metodología de estudio comprende: levantamiento de las unidades geológicas, la identificación en terreno de fallas con actividad durante el cuaternario y la aplicación de señales morfométricas. Se realizaron dos levantamientos con perfiles Swath usando la librería de Matlab TerraceM y Topotool Box, con el fin de buscar señales morfométricas que busquen estimar parámetros geométricos de las estructuras levantadas. Se observan desniveles topográficos de hasta 180 m en la zona de traza de la falla. Además de esto, se realizaron 4 perfiles con georadar The Cobra Plug-In, facilitado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, aparato que mide el tiempo transcurrido en la propagación de ondas de radiofrecuencia transmitidas y reflejadas en superficie. Este método permitió identificar la geometría de las estructuras y contactos estratigráficos deformados hasta 100 m de profundidad, para esto se utilizarán frecuencias de antena de 50 y 100 MHz (Audemard et al., 2006). Esta antena transmite las ondas de radiofrecuencia al subsuelo y puede identificar distintos materiales cuando la interfase entre ellos tiene diferentes propiedades electromagnéticas (e.g., σ : conductividad, ϵ : constante dieléctrica, v : velocidad de propagación y μ : permeabilidad magnética). Los resultados muestran que las unidades sedimentarias cuaternarias se encuentran desplazadas por una falla de carácter normal, con un salto de hasta 3 m y un manto de 57° vergente hacia el sur. Los perfiles de georadar indican perturbaciones en la zona de deformación, las cuales se han interpretado como diferencias de manto en las capas y fracturas de tensión del material aluvial. Estos sedimentos engranan hacia el este con una ceniza volcánica datada en 1.137 $\pm$ 0.017 Ma (Ar-Ar en biotita). Finalmente, la integración de la información geológica levantada y los resultados obtenidos con las distintas técnicas mencionadas, permiten indicar que la zona presenta un alto potencial sísmogénico asociadas con la actividad de fallas corticales.

Palabras claves: Neotectónica, GPR, Chile Central, terrazas marinas, Matlab

Financiamiento: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de la Beca de Magíster para Funcionarios/as Sector Público-año Académico 2021 (folio 79210164) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)

Agradecimientos: Se agradece al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Referencias:

- Aron, F., Cembrano, J., Astudillo, F., Allmendinger, R., Arancibia, G. (2014). Constructing forearc architecture over megathrust seismic cycles: Geological snapshots from the Maule earthquake region, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 127 (3-4): 464-479.
- Arriagada, C., Arancibia, G., Cembrano, J., Martínez, F., Carrizo, D., Van Sint Jan, M., Sáez, E., González, G., Rebolledo, S., Sepúlveda S.A., Contreras-Reyes C., Jensen, E., Yáñez, G., (2011). Nature and tectonic significance of co-seismic structures associated with the Mw 8.8 Maule earthquake, central-southern Chile forearc. *Journal of Structural Geology* 33 (5), 891-897.
- Audemard, F., Ollarves, R., Díaz, G., Bechtold, M., Cataldi, A., (2006). El geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV [online]*, vol. 21, N°4, pp. 57-70.
- Cembrano, J., Lavenue, A., Yáñez, G., Riquelme, R., García, M., González, G., Hérial, G., (2007). Neotectonics. En Moreno, T. *The Geology of Chile*. Geological Society Special Publication, pp. 231-261.
- Lavenue, Alain y Encinas, Alfonso. (2005). Deformación frágil de los depósitos neógenos de la cuenca de Navidad (Cordillera de la Costa, 34°S, Chile central). *Revista geológica de Chile*, 32(2), 229-248.
- Marquardt, C., Lavenue, A., Ortlieb, L., Godoy, E., Comte, D., (2004). Coastal neotectonics in Southern Central Andes: Uplift and deformation of marine terraces in Northern Chile (27°S). *Tectonophysics* 394, 193-219.
- Moreno, M., Rosenau, M., Oncken, O. 2010. (2010). Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 467, 7312, 198.
- Santibáñez, I., Cembrano, J., García-Pérez, T., Costa, C., Yáñez, G.; Marquardt, C., Arancibia, G., González, G. (2019). Crustal faults in the Chilean Andes: geological constraints and seismic potential. *Andean Geology* 46 (1): 32-65.

Análisis de sismicidad en el sur de las Sierras Pampeanas, Provincia de San Luis

Silvana L Spagnotto¹⁻²⁻³, Augusto Francisco Morosini¹⁻³, Lara Dardanelli¹, Marina Escobares¹⁻³, Andrés Richard¹⁻³,
Laura Giambiagi³⁻⁴

(1) Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, San Luis, Argentina

(2) Universidad de Buenos Aires, Exactas, Ciudad Universitaria, CABA

(3) CONICET, Argentina

(4) IANIGLIA, Grupo de Tectónica, Mendoza, Argentina

Estudiar la actividad sísmica en la región de San Luis es de suma importancia para identificar posibles fallas geológicas activas, que pueden representar un riesgo significativo para las comunidades desarrolladas en la región. En los últimos 100 años ocurrieron dos terremotos importantes, uno el 22 de mayo de 1936 en San Francisco del Monte de Oro, de magnitud aproximada 6 y otro el 11 de junio de 1934, en Sampacho, Córdoba de magnitud similar. Ambos eventos presentaron importantes daños en la zona. También podemos destacar el sismo del 19 de noviembre de 2019 de $M_w = 5.7$ en las cercanías de Beazley, aunque no produjo daños importantes por estar ubicado en un sector de escasa población. Además de ello, hay actividad sísmica regular en la provincia de San Luis, con magnitudes de 3 y 4, todos los años, pero son pocos los estudios en sismología. En este trabajo presentamos relocalizaciones de sismos y sus mecanismos focales obtenidos a través de primeros movimientos de ondas P. Usamos datos de estaciones de INPRES, de IRIS (<https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/forms/breqfast-request/>) y de estaciones instaladas en proyectos propios. Los eventos analizados son desde 2017 hasta la actualidad.

Aunque los sismos estudiados aquí tienen magnitudes bajas, son importantes para entender la deformación y la tectónica actual en el sector. La vinculación de las fallas geológicas potencialmente activas con la sismicidad bien localizada podría además aportar en estudios de peligrosidad y posteriores estudios de riesgo sísmico. En general, se buscó asociar los eventos con los rasgos morfológicos en superficie. Debido a que los sismos poseen magnitud moderada y son ligeramente profundos (la mayoría >20 km) vimos que los deslizamientos de los mecanismos focales no siempre tienen una correlación directa a las estructuras mapeadas.

En particular encontramos 4 sismos normales en sector austral de la Sierra de San Luis, con algo de componentes de rumbo, relacionados a estructuras orientadas en direcciones E-O. También encontramos mecanismos focales de rumbo, aunque asociados a las Serranías Occidentales y en el frente de la Sierra de Comechingones. Estos eventos de rumbo podrían asociarse a rampas laterales que acomodan la deformación de las fallas que levantan las sierras antes mencionadas, aunque cabe aclarar que, con la escasa información existente hasta el momento, no es posible aseverar esta hipótesis. El resto de los sismos posee mecanismos focales inversos con mayor o menor participación de componentes de rumbo, tanto dextrales como sinestrales. Todos podrían asociarse, debido a su profundidad, a los sistemas de fallas responsables del levantamiento de las Sierras de Comechingones, San Luis y las Serranías Occidentales.

Por último, se analizó el sismo $M_w = 5.7$ del 19 de noviembre de 2019, que posee un mecanismo focal inverso que relacionamos con la inversión tectónica de las fallas de la cuenca de Beazley.

Si bien se buscó asociar la sismicidad recolectada a los rasgos morfoestructurales que pudieran evidenciar su actividad, todavía existe una brecha de información entre los que sucede a profundidades mayores a 20 km y las estructuras superficiales que modelan la topografía. Por último, los mecanismos inversos de dos sismos presentan un comportamiento concordante con la falla observada en Nogolí, la cual presenta rumbo 25° , buzamiento 40° y rake 78° , en las coordenadas $32,920^\circ\text{S}$, $66,298^\circ\text{O}$, donde se ponen en contacto el basamento de la Sierra de San Luis con depósitos de edad neógenos-cuaternarios.

Palabras claves: Sismología, mecanismos focales, Sierra de San Luis, Sierras Pampeanas

Financiamiento: Proyectos PICT2019- 00854, PROIPRO-UNSL 03-1520, PICT2019- 00800, y EU35-UNSL10806.

Agradecimientos: A INPRES y a www.iris.edu por permitirnos el uso de las estaciones sismológicas.

Análisis de la sismicidad en torno al volcán Osorno y su relación con el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, región de Los Lagos

Kattia Varas Muñoz¹, Cristian Farías Vega¹⁻², Inés Rodríguez Araneda¹⁻²

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega #2950, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica de Temuco, Centro de Investigación en Evaluación de Riesgos y Mitigación de Peligros Geológicos Geokimün, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega #2950, Temuco, Chile

El análisis de la distribución espacial de sismos volcano-tectónicos (VT) permite determinar el mecanismo que los genera. El volcán Osorno (<ca. 200 ka., 41,4°S; 72,5°W) representa un caso de considerable importancia para el estudio de la relación entre sismicidad y volcanismo. Entre 1575 y 1835 el volcán Osorno registró 17 erupciones documentadas (Petit-Breuilh, 1999).

A la fecha han transcurrido 187 años sin que el volcán Osorno haya presentado una erupción, limitándose solo a actividad fumarólica, cuya intensidad fue disminuyendo hasta ausentarse en los reportes más recientes (Moreno et al., 2010).

Pese a su relativamente largo silencio, entre abril y septiembre de 2018 el volcán presentó una crisis sísmica, provocando que el Observatorio Volcanológico de Los Andes del Sur del Servicio Nacional de Geología y Minería (OVDAS-SERNAGEOMIN) aumentara su nivel de alerta de verde a amarillo. Esta crisis se caracterizó por un incremento paulatino tanto en el número de eventos de tipo VT como en la magnitud de estos, los cuales se concentraron en el flanco NNW del cráter, lo que ha sido interpretado como un signo de agitación volcánica (Morgado et. al., 2022).

Para el análisis de la sismicidad en el volcán Osorno se instaló una red sismológica compuesta por un total de 20 equipos durante el periodo de un año. De esta red se utilizaron los datos de 8 estaciones, durante los periodos de junio de 2021 y marzo de 2022. Los datos fueron procesados en ObsPy y SEISAN. De los eventos seleccionados se obtuvo localización, magnitud y mecanismos focales.

Los resultados indican dos cluster de sismos, uno ubicado en el flanco NNW del volcán, cuya profundidad se encuentra entre 3 y 8 Km y otro ubicado al E del volcán, cuya profundidad fluctúa entre 8 y 15 Km. Se propone la existencia de una falla inversa no mapeada de disposición N-S, paralela a la FLO. Los mecanismos focales indican una zona de compresión en el volcán y una extensión entre el macizo y la FLO.

Se propone un sistema de pull apart vertical entre el volcán y la FLO, esta última sería el canal de ascenso de fluidos. La tensión entre la falla inversa y la transpresiva dextral habría generado una zona extensiva que aloja un reservorio profundo (8-15 Km), el cual se conecta a un reservorio más somero (3-8 km) a través de un enjambre de diques o fracturas. Dado que este reservorio se encuentra en una zona compresiva, el magma se aloja durante más tiempo, por lo que se diferenciaría geoquímicamente del reservorio más profundo.

Palabras claves: volcanotectónico, mecanismos focales, volcán Osorno

Financiamiento: Proyecto "Volcano-Tectonic source detection in a complex system of volcanoes and faults", United States Army Research Office y Universidad Católica de Temuco.

Referencias:

- Moreno, H., Lara, L.E., & Orozco, G. (2010). Geología del volcán Osorno, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 126: 31 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.
- Morgado, E., Morgan, D. J., Harvey, J., Castruccio, A., Brahm, R., McGee, L. E., ... & Hammond, S. J. (2022). The Magmatic Evolution and the Regional Context of the 1835 AD Osorno Volcano Products (41° 06'S, Southern Chile). *Journal of Petrology*, 63(11.)
- Petit-Breuilh, M. E. (1999). Cronología eruptiva histórica de los volcanes Osorno y Calbuco, Andes del Sur (41°-41°30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN-OVDAS (2017 a). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV) - Región de los Lagos, volcán Osorno 2017, diciembre 19, 18:30 (local time).
- SERNAGEOMIN-OVDAS (2018 a). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV) - Región de los Lagos, volcán Osorno 2018, junio 23, 11:00 (local time).
- SERNAGEOMIN-OVDAS (2018 b). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV) - Región de los Lagos, volcán Osorno 2018, agosto 5, 11:47 (local time).
- SERNAGEOMIN-OVDAS (2019). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV)- Región de los Lagos, volcán Osorno, febrero 2019.
- SERNAGEOMIN (2020). Nuevo ranking de riesgo específico de volcanes activos en Chile. Extraído el 18 de noviembre de 2022. . <https://www.sernageomin.cl/sernageomin-da-a-conocer-nuevo-ranking-de-volcanes/#:~:text=Los%20volcanes%20m%C3%A1s%20peligrosos,%2C%20Longuimay%2C%20Hudson%20y%20L%C3%A1scar>.
- SERNAGEOMIN (2022). Sismos VT asociados al volcán Osorno y Calbuco, facilitados a través del Portal de Transparencia.
- SERNAGEOMIN-OVDAS (2022). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV)- Región de los Lagos, volcán Osorno, 17 de septiembre de 2022.
- SERNAGEOMIN (2023). Sismos VT asociados al volcán Osorno durante el periodo de enero a diciembre de 2018. Facilitados a través de Portal de Transparencia.

The IPOC Creepmeter Array 2.0: Investigating the full parameter space of external and internal factors controlling seismic and aseismic fault slip behavior of the Atacama Fault System

Pía Victor¹, Anja Schleicher¹, Rebecca Harrington², Emily Brodsky³, Gabriel Gonzalez⁴

(1) German Research Centre for Geosciences GFZ, Potsdam, Germany

(2) Ruhr University, Bochum, Germany

(3) University of California, Santa Cruz, United States

(4) University Católica del Norte, Antofagasta, Chile

Surface ruptures along active fault segments document seismic fault behavior during past earthquakes and therefore are important indicators of potentially locked fault segments today. Yet the partitioning of seismic and aseismic behavior in active faults often is not as clearly defined, especially if surface ruptures occur along complex and mature fault systems like the Atacama Fault System (AFS) in N-Chile.

The IPOC Creepmeter array (www.ipoc-network.org/observatory/creepmeter/creepmeter-at-ipoc/), monitors fault slip accumulation patterns across four seemingly locked fault segments of the AFS. The monitored fault segments are located in the Coastal Cordillera of N-Chile and their paleoseismological records document past fault ruptures with Magnitudes up to Mw=7 with recurrence intervals on the order of a few thousand years. The geological past of the AFS led to a highly complex structural and compositional heritage of the fault zone, which is an important parameter controlling fault frictional behavior.

This instrumental dataset covers a time span of 10 years at 11 monitoring sites and comprises a wide spectrum of slip behavior ranging from triggered slow-slip events with velocities on the order of 10-3m/s-10-8m/s and durations of 0,02 seconds to accelerated creep events lasting several months. Approximately 80-90% of slip transients are triggered by earthquakes in both the near and far field, but we also observe climatic triggering for long-duration creep transients in which rainfall plays a key role.

Comparing these observations with the fault gouge properties at the monitored sites, we find a strong correlation of segments exhibiting mature fault cores with thick and well-developed fault gouges at the monitoring site and prevalence of fault creep. To a lesser extent these segments are also susceptible to triggered slow slip. On the other hand, we find a dominant behavior of triggered slip events on an incipient rupture with only fine coating of phyllosilicates on <1mm slip planes that was activated in a 1.5-year creep event after the unusual 2015 rain event in the area. We hypothesize that the monitored fault segments are sufficiently weak and can be triggered easily by EQs in the near field or far field, but additionally change their fault slip behavior driven by external forcing in combination with internal structure, composition and fluid flow.

These results demonstrate the ability to extract time dependent fault frictional behavior from time-series collected with the IPOC Creepmeter array, together with fault gouge properties studied in the field. Extending the parameter space for external forcing of triggered slip in combination with investigation of fault gouge structural and compositional properties will enable to broaden our understanding why small-scale triggering might result in large fault rupture at a given time.

Keywords: active tectonics, fault monitoring, fault frictional behavior.

Evidencias geomorfológicas de los límites del casquete de hielo durante el pleistoceno tardío en Isla Navarino (55°S)

Carola Lohido¹, Germán Aguilar Martorell¹⁻², Fernando Poblete¹, Scott Reynhout¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Avenida Tupper 2007, Santiago, Chile

Los límites del Campo de hielo Patagónico (CHP) durante la última glaciación han sido estudiados arduamente por múltiples autores, situando recurrentemente la máxima extensión suroriental del casquete de hielo sobre Isla Navarino y sus cercanías. Sin embargo, se han realizado escasas descripciones geomorfológicas sobre la isla para la delimitación de cuerpos de hielo. El objetivo de este trabajo es la descripción y caracterización morfológica de Isla Navarino a gran escala. Para este propósito se analizó la morfometría de la isla utilizando herramientas geomáticas como softwares SIG y modelos de elevación digital, y se confeccionaron cartografías geomorfológicas con el uso de imágenes satelitales y observaciones de terreno. Del análisis morfométrico de la Isla Navarino se reconocieron tres altos topográficos (AT) concentrados en las porciones occidental centro-norte y oriental de la isla y una depresión ubicada en la porción sur y suroriental de la isla.

El análisis morfométrico y las características de estas unidades morfométricas sugieren consideraciones en la traza de los límites espacio-temporales del CHP. La reconstrucción más reciente de la evolución del CHP corresponde al trabajo de Davies et al. (2020)[1] en donde trazan sobre la isla los límites del hielo en el extremo sureste del casquete a los 20, 25 y 30 ka. Particularmente según los límites presentados en Davis et al. (2020) los AT Central y Occidental habrían estado cubiertos por hielo del CHP entre los 30 y 20 ka, mientras que el AT Oriental no. Se propone que el AT Central se habría descubierto del CHP en sus zonas más altas, antes que el AT Occidental y Oriental, permitiendo el desarrollo de glaciares de valle, locales, que generan la morfología rugosa observada en el AT Central. Por otra parte, según Davies et al. (2020) el AT Oriental no habría sido cubierto de hielo al menos desde los 35 ka, es decir, que la última vez que fue cubierto por hielo habría sido antes de la última glaciación. Mientras que las similitudes morfológicas entre el AT Oriental y Occidental, las formas suavizadas y de mesetas, indicarían un proceso moderador común, por el casquete de hielo asociado al CHP, siendo superficies que han sido sometidas a similar cantidad de tiempo en similares condiciones de modelamiento bajo el hielo. El límite del CHP a los 30 ka propuesto por Davies et al. (2020) disecta parte importante de la depresión suroriental, particularmente en su zona cercana al nivel del mar, sugiriendo que el hielo no cubrió por completo el sureste de la isla, lo cual proponemos considerar en la reconstrucción del CHP en la última glaciación.

Palabras Clave: Isla Navarino, Campo de Hielo Patagónico, Límites glaciales, Patagonian Ice Sheet, Última Glaciación.

Agradecimientos: Agradecimientos al Profesor Joseph Martinod de la Université Savoie Mont Blanc, a la comunidad de Isla Navarino y a la Universidad de Chile.

Referencias:

- [1] Davies, B. J., Darvill, C. M., Lovell, H., Bendle, J. M., Dowdeswell, J. A., Fabel, D., Gracia, J. L., Geiger, A., Glasser, N. F., Gheorghiu, D. M., Harrison, S., Hein, A. S., Kaplan, M. R., Martin, J. R. V., Mendelova, M., Palmer, A., Pelto, M., Rodes, A., Sagredo, E. A., Smedley R. K., Smellie J. L., Thorndycraft, V. R. (2020). The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth-Science Reviews*, 204, 103152. ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152>

Sincronismo de la desglaciación en valles andinos de Atacama y Patagonia durante el Pleistoceno tardío

Germán Aguilar Martorell¹

(1) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Avenida Tupper 2007, Santiago, Chile

Guardando las diferencias en cuanto a la magnitud de las geoformas, los avances glaciares y la deglaciación han dejado huellas geomorfológicas en valles cordilleranos andinos, desde el extremo sur del Desierto de Atacama por el norte, hasta el extremo meridional de la cadena andina en Patagonia. Aguilar et al. (2022, 2023), presentan cartografías geomorfológicas detalladas de estas huellas geomorfológicas y edades de exposición de 10Be en el valle del río El Encierro (29°S), localizado en el extremo sur de Atacama y en el valle del río Bayo (46°S) localizado en Patagonia. Las edades de exposición 10Be de superficies rocosas moldeadas por glaciares confirman que el valle del río Bayo quedó libre de glaciares al menos hace 15 ka. Este valle constituyó la primera salida del lago Chelenko, precursor del lago General Carrera-Buenos Aires, hacia el océano Pacífico. Esta edad limita el momento de la inversión del drenaje del lago desde el Océano Atlántico hacia el Océano Pacífico. Más allá de las consideraciones hidrológicas que tienen estos resultados, las edades de exposición 10Be confirman que el valle ya estaba retrocedido hasta una posición muy cercana a los actuales límites glaciares hace 15 ka, e incluso lo podría haber estado a una edad tan temprana como hace 17 ka. Lo anterior indica una rápida desglaciación entre los 20-17 ka. Para el Valle del río El Encierro (Atacama), los antiguos glaciares se extendieron 16 km desde la cabecera, donde construyeron arcos morrénicos terminales en patrones telescópicos entre 39 y 26 Ka antes del presente. Las edades de exposición, tanto en morrenas laterales como en superficies rocosas moldeadas por glaciares, indican una etapa de recesión glacial entre 20 y 18 Ka antes del presente. Arcos morrénicos localizados a solo 5 Km de la cabecera del valle corresponden a pequeños avances glaciares que llegaron a su máximo avance hace 17-18 ka. Para explicar esto último, el hielo debería haber desaparecido rápidamente en la mayor parte del valle hace 18 ka y no haber ocurrido avances glaciares de importancia después de los 17 Ka. Estos trabajos sugieren una sincronía de la desglaciación y conexión en torno los factores que determinan el retroceso glacial en estos dos valles que se sitúan a miles de kilómetros de distancia. La rápida deglaciación ocurrida entre los 20-17 ka podría estar relacionada con el desplazamiento hacia el sur de los vientos del suroeste y su debilitamiento, tal como se informa en otros archivos paleoclimáticos para este período. Por otra parte, los resultados sugieren que luego de la desglaciación del Pleistoceno tardío, el máximo avance de los glaciares no excede por mucho a la actual posición de los glaciares y posiblemente ocurrió durante la Pequeña Edad de Hielo.

Palabras Clave: Desglaciación, Edades de exposición de 10Be , Sincronismo, Atacama, Patagonia.

Referencias:

- Aguilar et al. 2022. Chronology of Glacial Advances and Deglaciation in the Encierro River Valley (29° Lat. S), Southern Atacama Desert, Based on Geomorphological Mapping and Cosmogenic 10Be Exposure Ages. *Front. Earth Sci., Sec. Quaternary Science, Geomorphology and Paleoenvironment*, Volume 10. doi: [10.3389/feart.2022.878318](https://doi.org/10.3389/feart.2022.878318).
- Aguilar et al. 2023. Chronology of the Bayo River valley deglaciation and implications for the Late Pleistocene Atlantic-to-Pacific drainage reversal of the General Carrera-Buenos Aires palaeolake, Patagonia-Chile. *Andean Geology* 50 (1): 1-21. doi: [10.5027/andgeoV50n1-6460](https://doi.org/10.5027/andgeoV50n1-6460).

Respuesta geomorfológica a una perturbación de gran magnitud: El caso del Río Nilahue, Región de los Ríos, Chile

Gabriela Arancibia Muñoz¹, Karla Sánchez Cortez², Alberto Paredes²⁻³, Andrés Iroumé²

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Hidromorfología, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Valdivia, Chile

(3) Universidad Austral de Chile, Programa de Doctorado en Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Valdivia, Chile

Los escenarios de cambio climático plantean un incremento en eventos meteorológicos extremos y concentración de la precipitación en los meses de invierno, aumentando el interés en advertir la magnitud de la respuesta geomorfológica de los ríos a perturbaciones de baja frecuencia (LIDs). Durante el invierno de 2022 lluvias con un periodo de retorno de gran magnitud se registraron en la cuenca hidrográfica del río Nilahue perteneciente a la comuna de Río Bueno, la cual generó cambios en su configuración morfológica. El objetivo de esta investigación es comprender el cambio morfológico del río Nilahue y la evolución de los procesos hidrosedimentarios para entender el funcionamiento de los ríos a LIDs. El estudio utiliza una combinación de análisis hidrológicos, levantamientos de campo y técnicas de teledetección para evaluar los cambios geomorfológicos inducidos por LIDs. Se caracterizaron eventos hidrometeorológicos de acuerdo a su periodo de retorno, utilizando base de datos pluviométricas y fluviométricas de estaciones cercanas, permitiendo identificar la magnitud de los eventos ocurridos durante el periodo de estudio. Los levantamientos de campo incluyeron mediciones topográficas, levantamientos fotogramétricos y análisis de secciones transversales del cauce. Se utilizaron técnicas de teledetección, aplicadas a imágenes obtenidas a través de vuelos de UAVs, para identificar y cuantificar la magnitud de los cambios en el sistema fluvial. Los hallazgos de este estudio revelan alteraciones significativas en la morfología del cauce y los patrones de transporte de sedimentos como resultado del LIDs. El cauce experimentó ensanchamiento, erosión de márgenes y depósito de sedimentos en áreas específicas. El transporte de sedimento se vio incrementado, lo que resultó en un aumento de la carga de fondo y el transporte de madera de gran tamaño. Estos cambios en el sistema fluvial son indicativos de la respuesta geomorfológica al evento de un LIDs. Por medio de este análisis se han identificado umbrales críticos de precipitación y caudal que desencadenan una respuesta geomorfológica significativa. Comprender la respuesta geomorfológica de los ríos a perturbaciones LIDs es crucial para una gestión y planificación efectivas de los ríos. Los conocimientos obtenidos de este estudio pueden contribuir al desarrollo de estrategias para mitigar los impactos de dichas perturbaciones y mejorar la resiliencia de los sistemas fluviales.

Palabras Clave: Perturbaciones de baja frecuencia (LIDs), Cambio morfológico, Teledetección, Análisis hidrológico, Material leñoso.

Financiamiento: Este estudio fue realizado bajo el financiamiento del proyecto ANID/FONDECYT 1200079.

Role of sediment and climate variability in strike-slip fault landscapes: insights from numerical simulations

Tamara Aránguiz-Rago¹, Alison Duvall¹

(1) University of Washington, Department of Earth and Space Sciences, 4000 15th Ave NE, Seattle, WA 98195, Seattle, USA

Introduction

Field-based observations and numerical models of lateral-slip faults have shown that the preservation of offset geomarkers is dependent on fault slip rates and surface erosional activity (Wallace, 1968; Duvall and Tucker, 2015; Dachser-Cousineau et al., 2021). Desert environments are particularly sensitive to climate changes and provide an excellent record of landscape modification. Despite the valuable information that deserts offer, little research has been done on the interaction between lateral faulting and surface processes in these environments. Recent one-dimensional models of strike-slip faults have been tested in semiarid regions, suggesting that bedload transport in river channels limits the long-term evolution of fault-crossing channels (Dachser-Cousineau et al., 2021). Additionally, mean annual precipitation has been proposed as the primary factor controlling the preservation of offset channels, implying that past and present climate affect the geomarkers used to interpret the tectonic history of strike-slip faults (Reitman et al., 2023). However, it remains unclear how applicable these observations are over larger (mountain range) scales and over a longer time (millions of years).

The drainage patterns in the Salar Grande, a hyperarid intermountain basin located in the Atacama Desert in Northern Chile, exhibit perturbations resulting from dextral fault activity. The region has not experienced significant fluvial erosion for hundreds of years (or more), and reliable estimates of mean annual precipitation are lacking. Field observations indicate past incision and deposition recorded in the ephemeral channels and abandoned terraces, continuous filling of sediment from the hillslopes, and intense weathering on the bedrock. Studying how surface processes and tectonic processes interact in a landscape such as the Salar Grande provides a unique opportunity to study the impact of lateral motion of a strike-slip fault in the absence of vigorous fluvial erosion. Inspired by these observations, using a landscape evolution model (LEM), we aim to investigate how intermittent fluvial incision periods affect the topographic response of a hyperarid landscape that can transition from transport-limited (erosion of bed is controlled by the ability of the river to transport the sediment material) to detachment-limited conditions (erosion is controlled by the efficacy of the river to erode bedrock), while being offset by a right-lateral strike-slip fault. Our simulation results provide valuable insights into the complex interactions between tectonic and surface processes in hyperarid environments, shedding new light on the evolution of strike-slip fault systems in the absence of significant continuous fluvial erosion, which has important implications for understanding the geological history of arid regions on Earth and potentially other planets.

Method

To model a landscape similar to the Atacama, we utilize Landlab, an open-source Python package, as our modeling environment (Hobley et al., 2017; Barnhart et al., 2020; Hutton et al., 2020). To start our simulation, we create topography of an uplifted landscape and drive it to steady state (meaning topography is relatively unchanging) under a series of geomorphic processes before introducing the strike-slip fault. Our LEM incorporates several key components that, when used together, differentiate it from previous contributions. Firstly, we incorporate a fluvial incision model that can distinguish between bedrock and alluvium/colluvium, as proposed by Shobe et al. (2017). Additionally, we use a non-linear diffusion model that can creep a layer of soil, and we consider the effect of weathering on the transformation of bedrock into soil (Barnhart et al., 2019). Once steady-state is reached ($dz/dt=0$) we define the grid at that point as our initial conditions (Fig. 1a). After that, we let uplift continue across the entire domain, and initiate landscape modification via strike-slip faulting and climate variability.

In mathematical terms, our topography (z) is modeled by an equation that shapes bedrock surface (R) and soil thickness (H):

$$dz/dt = dR/dt + dH/dt - Vdz/dx \quad (1)$$

Where V [LT^{-1}] is the slip rate of the fault, which advects the topography z in the x domain. Expanding each of the processes that shape bedrock and soil we have:

$$dR/dt = U - E_{Rfluv} - W \quad (2)$$

Where U represents rock uplift relative to the base level [LT^{-1}]; E_{Rfluv} represents the fluvial bedrock erosion rate as volume flux per unit bed area [LT^{-1}] and W is weathering of rock which is transformed into soil [LT^{-1}]. Now following Davy and Lague (2009) for the fluvial changes in soil thickness we can represent the evolution of soil in our model as:

$$dH/dt = (1 - \nabla \cdot \mathbf{q}) (W + D_{sfluv} - E_{sfluv}) \quad (3)$$

$$\text{where, } W = P_{0e-H/H^*} \quad (4)$$

$$\text{and, } D_{sfluv} = Q_{sfluv} Q_v \quad (5)$$

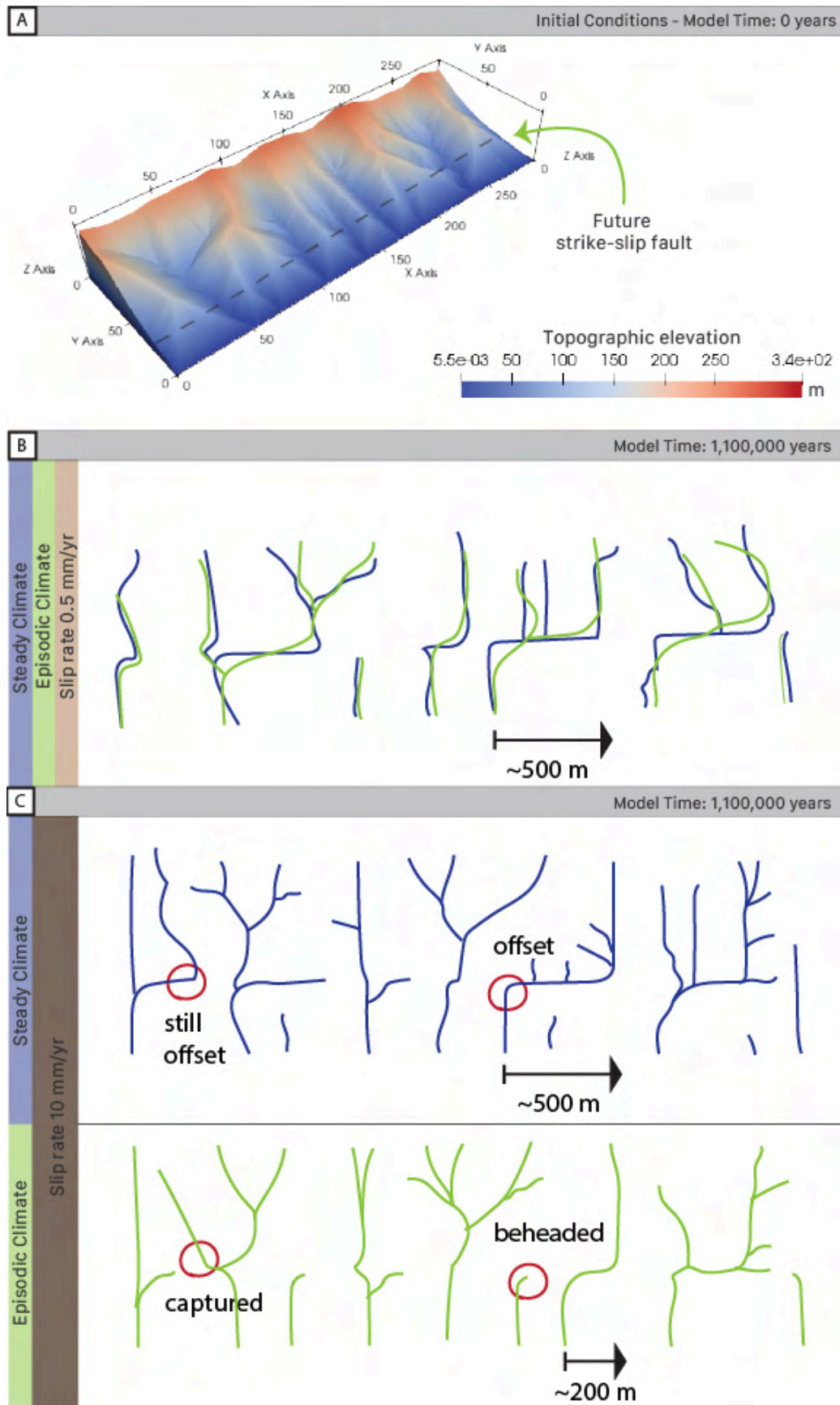


Figure 1. A. Initial conditions of the model domain with vertical axis z colored and illustrated with colorbar. Location of strike slip fault indicated in dashed gray line. Channel morphology sketch from model outputs **B.** Channel morphology at 0.5 mm/yr slip rate overlapping steady climate and episodic climate. **C.** Top shows channel morphology at 10 mm/yr slip rate and steady climate, and bottom at same slip rate under episodic climate.

Sediment porosity is, E_{sfluv} represents the sediment erosion rate [LT^{-1}], D_{sfluv} is the sediment deposition flux [LT^{-1}] and τ_s is the sediment flux due to soil creeping and fluvial transport [L^2T^{-1}]. In eq. 4 weathering is represented by P_0 which is the maximum soil production rate under zero soil thickness [LT^{-1}], H is thickness of the soil [L] and H^* is the soil production rate decay [L]. Finally, the sediment deposition flux in eq. 5 is calculated by the volumetric sediment discharge Q_{sfluv} [L^3T^{-1}], Q which represents the volumetric water discharge [L^3T^{-1}], and v [LT^{-1}] the effective settling velocity of the sediment. For the purposes of this abstract, the most relevant factors to consider are the inclusion of sediment in the evolution of our topography in the models and how this is controlled by parameters such as the settling velocity of the sediment (v).

Strike-slip fault function

To simulate the lateral motion of a strike-slip fault we create a simple function that can create a dislocation in the landscape at a location determined by the user. Our simplest model simulates a vertical strike-slip fault as a line without width that slides the upper domain of the fault to the right. This setting can be modified to make the fault left-lateral. In order to maintain the domain size, we utilize periodic boundary conditions, meaning that each cell of the domain that is displaced to the right and outside of the domain enters the domain on the left side giving continuity to the landscape (essentially wrapping back around with lateral fault motion).

Model scenarios

We explore a suite of scenarios to understand the impacts of varying climate and tectonic conditions on our strike-slip fault model. We are interested in examining how the slip rate affects the model outcomes, so we are testing values ranging from 0.5 to 20 mm/yr. Additionally, we set a baseline steady climate scenario, and an episodic climate scenario based on paleoclimate indicators from the Atacama Desert, where episodes of enhanced fluvial activity last 15,000 years and occur every 100,000 years. To account for changes in the topography related to the episodic climate, without introducing additional instability in the model, we scale the erodibility of sediment and bedrock (K [L^{-1}]) based on the frequency and duration of the humid periods as follows:

$$K_{episodic} = K_{steady-state} / (\text{duration}_{humid} / \text{frequency}_{humid})$$

To clarify, our scaling of erodibility compensates for the periods without fluvial erosion. In total, we conducted 8 model experiments and ran them for the equivalent of 6 million years in the simulations. Throughout the experiments, the hillslope diffusion and bedrock weathering were a continuous process for both the steady and episodic climate scenarios. We also maintained a constant slip rate of the fault and uplift regional rate throughout the entire duration of the experiment. In the episodic scenario, we represented the humid episodes by adding flow routing and channel erosion and deposition for the preset duration and frequency of enhanced fluvial activity.

Preliminary results, discussion, and implications

The main findings of the study are related to the channel response and hillslope response to both strike-slip fault motion and the varying climate. In terms of channels, we found interesting results in both dry and humid periods. Specifically, we pay special attention to the process of river capture and found that offset channels in episodic climates may "miss" a capture if the channel head and bottom are aligned during a dry period. This has important implications for the dynamics of drainage reorganization and landscape modification upstream of the fault, as capture causes an incision wave to migrate towards the headwater of the channels, which may not occur as frequently in settings with variable climate. The findings can be applied to other strike-slip fault settings, and field observations can be used to infer the control of fault activity and climate activity. For example, if a channel shows an "apparent capture" by the alignment of head and bottom parts crossing the fault, but no clear incision is seen, it can be inferred that the fault has moved the channels while low fluvial activity has dominated the surface processes.

When looking at humid periods we see a clear difference in the morphology of offset channels in the steady climate versus the episodic climate. Our findings showed that slow fault slip rates (0.5 mm/yr) under steady climate conditions resulted in channels with a sharp 90° turn when running along and across the fault, while the same amount of total slip under the same slip rate but in the episodic climate resulted in more diffuse channels (see Fig. 1b). This is due to sediment filling the channels during dry periods in the episodic climate, resulting in the channel flowing in a different path during the next humid period. However, we also found that the same pattern did not occur when analyzing faster faults (Fig. 1c), as fast structures were more dynamic and the channels reorganized in shorter periods of time. Additionally, both steady and episodic climate scenarios generated more variability in offset sizes, which is consistent with recent publications of strike-slip fault offsets (Reitman et al., 2023). Overall, our results indicate that climate variability and sediment play a significant role in changing channel flow, but the slip rate of the fault dominates landscape modification when faults are faster than surface processes.

Finally, analyzing the hillslope response, we found that our results differ from previous studies of strike-slip faults such as those conducted by Duvall and Tucker (2015). Specifically, we did not observe the intense mobility of ridges that have been reported in models that do not incorporate sediment. To explain this behavior, we analyzed the migration of the inflection point in the ridges along with the incision wave triggered by river capture. Our analysis revealed that although the inflection ridge point moves upward and laterally, the motion does not migrate all the way to the drainage divide. We suggest that in transport-limited landscapes, fluvial incision leads to an increase in sediment input from the hillslopes, which in turn reduces the efficiency of incision, producing a self-buffering effect, thus inhibiting ridge migration.

It is worth noting that our interpretation is ongoing and further experiments simulating a more humid landscape inspired by New Zealand topography have shown that we can observe ridge migration when sediment is present.

However, other factors such as the settling velocity of the sediment may play a crucial role in controlling the dynamics of ridges and the subsequent reorganization of valleys

The main limitations of our method are primarily related to the mathematical approximations of the processes simulated in the experiments and the numerous parameters that we need to choose to represent a landscape similar to our natural inspiration. Although we acknowledge that certain parameters, such as erodibility, sediment velocity, precise uplift rates, and soil production rate, remain unknown, we were still able to produce a stable landscape and modify it without producing unrealistic results. Moreover, the simplification of the strike-slip fault as a straight line without width is another significant limitation to consider when attempting to understand real-world observations based on numerical simulations. Despite these limitations, we find that such models with simplified physics can help us visualize long-term processes that would be impossible to witness in the real world.

In conclusion, our study has observed the dynamics of processes that have shaped a landscape like the Salar Grande Fault in the Atacama Desert and provides insights into the complex interplay between tectonics and surface processes in strike-slip fault settings in arid regions. We have observed that when surface processes “re-awaken” during wetter periods, they inherit a tectonically altered topography with fault-generated markers and scarps that will determine the sediment infill-incision cycle. Our findings shed light on the control that tectonics exert over erosional processes in strike-slip fault settings and contribute to quantifying the impact of lateral faulting on Earth’s surface dynamics.

Keywords: strike-slip fault, landscape evolution, numerical simulations, sediment transport, climate variability.

Financing: This research is funded by a Fulbright-ANID Doctorate Fellowship, Department of Earth and Space Sciences from the University of Washington, and a fellowship through the Community Surface Dynamics Modeling Systems (CSDMS) from the University of Colorado, Boulder.

References:

- Barnhart, K., Glade, R., Shobe, C., Tucker, G. (2019). Terrainbento 1.0: a Python package for multi-model analysis in long-term drainage basin evolution. *Geoscientific Model Development* 12(4), 1267–129.
- Davy, P., & Lague, D. (2009). Fluvial erosion/transport equation of landscape evolution models revisited. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F3).
- Dascher-Cousineau, K., Finnegan, N. J., & Brodsky, E. E. (2021). The life span of fault-crossing channels. *Science*, 373(6551), 204-207.
- Duvall, A. R., & Tucker, G. E. (2015). Dynamic ridges and valleys in a strike-slip environment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(10), 2016-2026.
- Hobbey, D. E., Adams, J. M., Nudurupati, S. S., Hutton, E. W., Gasparini, N. M., Istanbuluoglu, E., & Tucker, G. E. (2017). Creative computing with Landlab: an open-source toolkit for building, coupling, and exploring two-dimensional numerical models of Earth-surface dynamics. *Earth Surface Dynamics*, 5(1), 21-46.
- Hutton, E., Barnhart, K., Hobbey, D., Tucker, G., Nudurupati, S., Adams, J., Gasparini, N., Shobe, C., Strauch, R., Knuth, J., Mouchene, M., Lyons, N., Litwin, D., Glade, R., Giuseppicipolla95, Manaster, A., Abby, L., Thyng, K., & Rengers, F. (2020). landlab [Computer software].
- Reitman, N. G., Klinger, Y., Briggs, R. W., & Gold, R. D. (2023). Climatic influence on the expression of strike-slip faulting. *Geology*, 51(1), 18-22.
- Shobe, C. M., Tucker, G. E., and Barnhart, K. R. (2017). The SPACE 1.0 model: a Landlab component for 2-D calculation of sediment transport, bedrock erosion, and landscape evolution, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4577–4604.
- Wallace, R. E. (1968), Notes on stream channel offset by the San Andreas fault, southern Coast Ranges, California, in *Conference on Geologic Problems of the San Andreas Fault System*, vol. 11, pp. 6–21, Stanford Univ. Publication in Geological Sciences, Stanford.

Climate Aridity Delays Morphological Response of Andean River Valleys to Tectonic Uplift

Rebekah M. Harries¹⁻², Felipe Aron²⁻⁴, Linda A. Kirstein³

(1) Durham University, Institute of Hazard, Risk and Resilience, Durham, U.K.

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) & Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(3) The University of Edinburgh, School of Geosciences, Edinburgh, U.K.

(4) *Now at Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

In the South-central Andes, a complex, well documented relationship between climate, tectonics, erosion and topography has limited the understanding of the orogen's geomorphological evolution. Moreover, the history and timescales of sediment storage and evacuation, that are evident in the undated and unmapped valley fills and fluvial terrace sequences, are unknown. Our lack of constraint on how sensitively these landscapes respond to tectonic and climate change limits our understanding of how vulnerable they are to shifts in climate over the next century. It also limits our understanding of how sediment storage and evacuation might modulate bedrock incision and valley evolution. In this work, we explored whether steeper topography, and higher millennial and decadal erosion rates in the South-central Andes, between 33-37°S, are the result of higher rock uplift-rates or whether they record a more complex relationship with erosion and climate.

To do this we exploited recent advances in the mechanical modeling of subduction zones to predict differential rock uplift caused by motion of crustal-scale faults, and thereby isolate the contribution of tectonic uplift to mountain relief, computing how rock uplift has been recorded in river valley morphology. This method is powerful because it allows us to map spatially the variability in tectonic uplift driven by subduction zone mechanics. We can therefore explore the relative importance of climate, bedrock lithology and glaciation on spatial variability in mountain river morphology. We calculated the steepness and width of mountain rivers, and their local topography, to assess how these variables have responded to the predicted fault activity on both the wetter, western Chilean-side of the Andean Cordillera and the arid, eastern Argentinian-side.

Rivers on the Chilean-side have steep and narrow valleys, in stark contrast to those draining east across the Argentinian cordillera, whose valleys are variably wider and less steep. The Chilean rivers have responded to fault slip along the western mountain front by incising vertically and propagating a steepening zone upstream. In Argentina, there is little evidence of channel steepening despite predictions for higher vertical rock uplift rates. We hypothesize that the aridity of the Argentinian region has limited the transport capacity of the rivers to export their sediment fill and as a result, vertical incision has been inhibited and lateral incision and valley widening favoured. The long-term climate gradient appears to have been important in modulating the morphological response of these rivers to fault slip. These factors precondition future landscape sensitivity to both tectonic and climatic change.

Keywords: Climate, Tectonics, Sediments, Andean subduction zone.

References:

- Based on: Harries, R. Aron, F., and Kirstein, L. (2023). Climate aridity delays morphological response of Andean river valleys to tectonic uplift. *Geomorphology*, In Press, [doi:10.1016/j.geomorph.2023.108804](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108804).

Evolución de plataformas costeras rocosas en un contexto de alzamiento tectónico y condiciones de aridez: modelamiento de erosión marina vs meteorización intermareal

Camila Arróspide Vásquez¹⁻², Germán Aguilar², Hugo Carrillo³, Vincent Regard⁴

(1) Programa de doctorado en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

(3) Inria Chile Research Center, Av. Apoquindo 2827, Piso 12, Las Condes, Santiago, Chile

(4) GET, Université de Toulouse, CNRS, UPS, IRD, CNES, 14 Av. Edouard Belin, F-31400 Toulouse, France

Las costas rocosas son ubicuas en las líneas de costa del mundo, ocurriendo en todas las latitudes y en todos los ambientes morfogenéticos. En la actualidad, el estudio de la construcción y evolución del paisaje costero en costas rocosas conforma un desafío para las y los investigadores e ingenieros costeros. Esto debido a la intrincada relación entre una amplia variedad de procesos que operan a distintas escalas espaciales y temporales, en especial en costas rocosas. Por esto, variadas estrategias de modelamiento numérico han sido consideradas en la construcción de conocimiento en torno a esta problemática. Actualmente, el modelamiento conforma la mejor aproximación para entender la evolución de estas costas en tiempo y espacio y los distintos escenarios evolutivos que tendrían en el futuro. En este trabajo desarrollamos un modelo numérico para entender la influencia de un conjunto de procesos costeros en la evolución del paisaje a largo plazo (104-106 años) en costas rocosas. En general, gran parte de los modelos numéricos desarrollados considera únicamente la acción erosiva mecánica del oleaje para dar forma a las plataformas costeras (p.ej., Trenhaile, 2000). No obstante, se ha demostrado que la meteorización intermareal también ejerce un rol importante en el desarrollo de estas (Matsumoto et al., 2018). Por tanto, en este trabajo fueron considerados ambos procesos en la estimación de tasas de erosión costera y desarrollo y evolución de morfologías (p.ej., plataformas) para aportar nuevos antecedentes a uno de los debates más longevos de la geomorfología costera. Conjuntamente, los cambios relativos del nivel del mar debido a los ciclos eustáticos y el movimiento vertical del bloque continental también fueron considerados. El diseño de la investigación conformó dos etapas: (1) desarrollo y testeo del modelo y (2) validación del modelo desarrollado. La validación del modelo fue realizada a partir de la geomorfología de la costa del Desierto de Atacama, incluyendo datos de campo y análisis morfométrico a partir de modelos de elevación digital de alta resolución. Los resultados de este modelo y la investigación en sí misma son usados para entender la influencia de la meteorización intermareal y la erosión del oleaje en la evolución de costas rocosas en un contexto de alzamiento tectónico e hiperaridez.

Palabras Clave: erosión marina, meteorización intermareal, plataforma costera, modelo numérico, Desierto de Atacama.

Financiamiento: Beca Doctorado Nacional ANID N°21202368.FONDECYT N° 1221274: Data and physically consistent characterization of coastal changes via machine learning techniques: human-induced changes on near-shore sediment system in an arid rocky coast.

Agradecimientos: ANID/PIA Project AFB180004 de Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile.

Referencias:

- Matsumoto, H., Dickson, M. E., Kench, P. S., 2018. Modelling the relative dominance of wave erosion and weathering processes in shore platform development in micro- to mega-tidal settings, Earth Surf. Process. Landf., 43, 2642–2653, <https://doi.org/10.1002/esp.4422>.
- Trenhaile, A.S., 2000. Modelling the evolution of wave-cut shore platforms. Marine Geology 166, 163-178.

Caracterización de la erosión mecánica del oleaje en costas rocosas mediante un modelo numérico de transformación y propagación de energía

Camila Arróspe Vásquez¹⁻³, Hugo Carrillo², Germán Aguilar³

(1) Programa de doctorado en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Inria Chile Research Center, Av. Apoquindo 2827, Piso 12, Las Condes, Santiago, Chile

(3) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

Determinar tasas y mecanismos de erosión de costas rocosas continúa siendo un desafío fundamental para científicas/os e ingenieras/os costeros. El análisis de la evolución de costas rocosas, en especial aquellas de sustratos rocosos muy duros, presenta un alto grado de dificultad debido a que (1) los cambios de las morfologías costeras son muchas veces imperceptibles a escala humana, (2) la compleja relación y retroalimentación entre una amplia gama de procesos formadores de relieve y (3) la limitada y costosa obtención de datos de terreno en conjunto con una profunda comprensión de ciertos procesos, tales como la hidrodinámica cercana a la costa. Modelos numéricos de distintos grados de complejidad han sido amplia y largamente utilizados para entender la evolución costera y calcular tasas y mecanismos de erosión a diferentes escalas espaciales y temporales. El uso de modelos numéricos ha sido medular en el estudio de costas rocosas (p.ej., Trenhaile, 2000). Sin embargo, estos modelos usualmente simplifican la estimación de la erosión costera al ignorar o simplificar procesos como, por ejemplo, la hidrodinámica costera. La disipación de la energía del oleaje durante el rompimiento de las olas y su vínculo con la hidrodinámica costera permanece sin resolver y es materia de esta investigación. El objetivo de este trabajo es entender (1) cómo la distribución de la ubicación del punto rompiente de las olas afecta la transferencia de energía y la propagación del oleaje desde zonas profundas a la línea de costa y (2) cómo esto, a su vez, afecta la variabilidad espacial de las tasas de erosión. Este trabajo buscó caracterizar la variabilidad espacial, tanto en la zona intermareal como a lo largo de la costa, de las tasas de erosión costera debido a la acción mecánica de las olas mediante la modelación numérica. El modelo considera tres etapas que se llevan a cabo de manera sucesiva: (1) ecuaciones de rayos obtenido de la función de Airy (Sandanbata et al., 2018a); (2) modelo de balance de energía (Battjes y Janssen, 1978); (3) modelo de balance de fuerzas (Trenhaile, 2000). El modelo desarrollado determina (i) la trayectoria de un grupo de olas, (ii) la distribución de la ubicación del punto rompiente de un grupo de olas, (iii) la energía de la ola que llega a la línea de costa y (iv) las tasas de erosión, donde se determina además su distribución dentro del rango intermareal. Los anteriores puntos (i) y (ii) están controlados por la batimetría cercana a la costa y sus variaciones locales. Los datos de entrada del modelo corresponden a (1) la batimetría, (2) el régimen de olas en zonas profundas (altura, periodo, frecuencia), (3) características del rango intermareal (posición y duración de la marea) y (4) características del sustrato rocoso (coeficiente de resistencia). Los resultados muestran que las olas con menor altura al momento de formarse mar adentro (p.ej., $H_0 = 1$ m) tienen mayores posibilidades de romper cerca de la línea de costa, disipar menor energía y producir erosión. En aquellos lugares donde las olas rompen cerca de la costa, estas poseen suficiente energía mecánica para erosionar el sustrato rocoso. Esta posibilidad es favorecida en aquellos lugares donde la batimetría presentaba mayor pendiente. Los resultados de este trabajo muestran un comportamiento coherente con lo observado en la naturaleza. Este trabajo destaca las habilidades del modelo de estimar tasas de erosión costera considerando la hidrodinámica cercana a la costa en comparación a otros modelos existentes.

Palabras Clave: balance de energía, balance de fuerzas, costas rocosas, erosión costera, rompiente de olas.

Financiamiento: Beca Doctorado Nacional ANID N°21202368. FONDECYT N° 1221274: Data and physically consistent characterization of coastal changes via machine learning techniques: human-induced changes on near-shore sediment system in an arid rocky coast.

Agradecimientos: ANID/PIA Project AFB180004 de Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile.

Referencias:

- Battjes, J., and Janssen, J., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, New York, pp. 569-587.
- Trenhaile, A.S., 2000. Modelling the evolution of wave-cut shore platforms. *Marine Geology* 166, 163-178.
- Sandanbata, O., Watada, S., Satake, K., Fukao, Y., Sugioka, H., Ito, A., Shiobara, H., 2018a. Ray tracing for dispersive tsunamis and source amplitude estimation based on Green's law: application to the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, South of Japan. *Pure Appl. Geophys.* 175 (4), 1371-1385.

Exhumation and topographic evolution of the Chiapas Massif Complex (southern Mexico) constrained by thermochronologic data modeling along vertical profiles

Stephanie Brichau¹, Cesar Witt², Mauricio A. Bermúdez³, Charlotte Fillon⁴, Cecile Gautheron⁵, Andrew Carter⁶

(1) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse, Université Paul Sabatier, 14 avenue Edouard Belin, TOULOUSE, France

(2) Université de Lille, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Université Littoral Côte d'Opale, 42 rue Paul Duez, Lille, France

(3) Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Avenida Central del Norte 39-115, Sogamoso, Colombia

(4) TotalEnergies, Exploration-Production, Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF), avenue Larribau, Pau, France

(5) Université Paris-Saclay, GEOPS, Campus Universitaire d'Orsay, Rue du Belvédère, Orsay, France

(6) Birkbeck College, School of Earth and Planetary Sciences, University of London, Malet Street, London, United Kingdom

Constraining vertical motions of rocks within the lithosphere is central to understand landscape evolution and deformation across active margins. A number of factors can influence the deformation including plate convergence rate and direction, slab age and dip, geometry of the upper plate margin and its inherited structures, relief of subducted seafloor, and sediment volumes entering the trench. Understanding how these parameters contribute to local topography change of the overriding plate, in concert with active faulting and local climate, continues to be an area of ongoing research. As a consequence, the only way to properly interpret a thermochronologic data set is to combine data interpretation with numerical modeling. This is what we attempted to do in the Chiapas Massif Complex, which extends across almost the entire truncated margin of south Mexico and has evolved, in its southernmost segments, under the control of the diffuse triple junction between the Caribbean, North American and Cocos plates. Altogether, our zircon U-Pb, apatite fission tracks, apatite (U-Th)/He and numerical modeling combined with previously published data, show that exhumation started earlier in the south (~16 Ma) relative to the north (~9 Ma). Furthermore, thermochronological modeling defines steady-state evolution of the relief north of the Polochic fault, while south of the fault an inverted apatite (U-Th)/He vertical profile reveals a significant relief change between 5 and 1 Ma. The surface uplift recorded by the data set may have implied that the topography was 1.5 times amplified compared to its present-day altitude. This result is in agreement with previously published paleoenvironmental and geomorphological studies, demonstrating that the uplift is synchronous to the Altos Cuchumatanes range rise, inducing a local change of the precipitation repartition. Finally, our findings are consistent with kinematic models for the triple junction that predict localized compression as the triple junction propagates eastward and inland as the forearc sliver is dragged by the North American plate. The present study proves that thermochronologic data modeling is a powerful tool to resolve topography changes and understand the evolution of areas subject to intense deformation.

Keywords: Chiapas Massif Complex, Fault systems, Thermochronology, numerical modeling, Topographic change.

Financing: School of Earth and Planetary Sciences, Birkbeck College, University of London, UK; Institut de Recherche pour le Développement (IRD) France, BEST fellowship; Computing Center of the University of Toulouse, project CALMIP P16031; Project SGI-DIN-3104 of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Acknowledgments: Cluster Nuwa of the Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse France; Centro de Computación Científica Apolo at Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

La amplitud SAR y su aplicación en quebradas efímeras del desierto de Atacama impactadas por inundaciones repentinas (flash floods)

Albert Cabré^{1,2}, Odin Marc¹, Dominique Remy¹, Sebastien Carretier¹, Germán Aguilar²

(1) GET, Toulouse, Francia

(2) AMTC, Universidad de Chile, Santiago, Chile

Grandes volúmenes de agua y sedimentos fueron transportados aguas abajo y perturbando la vida de los habitantes de los valles de Atacama durante varios meses (muertos, zonas urbanas inundadas, etc.). El evento pluvial ocurrido en marzo de 2015 es el de mayor magnitud que ha afectado a la zona de estudio (Cabré et al., 2020 a,b; Aguilar et al., 2020; Garcés et al., 2022; Cabré et al., 2022) pero a posteriori, en estas regiones, se han sucedido otras inundaciones repentinas de menor magnitud durante, por ejemplo, mayo 2017 o marzo de 2022 generando nuevamente múltiples complicaciones a la población así como a las infraestructuras viales.

En este trabajo hemos probado la utilidad de la intensidad de retrodispersión de la señal del Radar de Apertura Sintética (SAR) de banda C (Sentinel-1) (en adelante sólo amplitud) para rastrear cambios superficiales en los fondos de los valles efímeros del Desierto de Atacama (27°S) tras eventos de inundación recientes. La amplitud SAR se puede utilizar como una medida indirecta de la rugosidad de la superficie y, por tanto, del tamaño de grano en superficies sin vegetación. Nos hemos centrado en canales (fondos de valle) efímeros para poder calibrar la intensidad SAR con medidas de campo del tamaño de grano para más de 150 estaciones de muestreo en 5 segmentos de valle de entre 10 y 20 km de longitud. Para validar los resultados obtenidos del análisis de series temporales de amplitud SAR además hemos explorado cómo las métricas topográficas (anchura del valle, área drenada, gradiente, etc.) controlan la localización relativa en los fondos de valle tanto de las distribuciones de tamaño de grano, así como de los procesos sedimentarios identificados (barras, canales, bloques imbricados, etc.).

Los valores de intensidad medidos en decibelios (dB) característicos de la amplitud SAR nos permiten identificar distintos tipos de superficies, lo que nos ha permitido realizar una rápida cartografía de los procesos y formas sedimentarias asociadas a estas avenidas. También nos ha permitido obtener indirectamente mapas regionales de la granulometría de los fondos de valle lo cual tiene un abanico enorme de aplicaciones en la ingeniería hidráulica de obras de mitigación para estos valles del Desierto de Atacama. Los mapas de intensidad de retrodispersión SAR complementados con otros enfoques de teledetección (coherencia InSAR) (Cabré et al., 2020a, 2022) pueden funcionar como predictores de los tipos de flujo dentro de los drenajes efímeros del Desierto de Atacama y, por lo tanto, ayudar en las estrategias de mitigación y a la comprensión de los cambios geomorfológicos en paisajes áridos durante eventos de precipitación extrema. Además, gracias al uso de series temporales de amplitud SAR (de hasta 8 años post evento) hemos podido desarrollar un modelo que permite reconstruir el tamaño de grano pre-avenidas o inundaciones repentinas reconstruyendo así el tamaño de grano de los valles.

Palabras Clave: inundaciones repentinas, flash floods, peligros geológicos, Synthetic Aperture Radar, Desierto de Atacama.

Financiamiento: ANID-Fondecyt de Iniciación 11220285, Investigador Principal: Albert Cabré.

Agradecimientos: Agradecemos el apoyo entregado de la ANID (Fondecyt de Iniciación 11220285), al centro de estudios del espacio francés CNES, al programa PNTS-INSU y al AMTC.

Referencias:

- Aguilar, G.*, Cabré, A., Fredes, V.* & Vilella, B.* (2020). Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: An assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1247–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1247-20208>.
- Cabré, A., Rémy, D., Aguilar, G.*, Carretier, S. & Riquelme, R.* (2020a). Mapping rainstorm erosion associated with an individual storm from InSAR coherence-loss validated by field evidence for the Atacama Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (9), 2091-2106. <https://doi.org/10.1002/esp.4868>.
- Cabré, A., Aguilar, G.*, Mather, A. E., Fredes, V.* & Riquelme, R.* (2020b). Tributary-junction alluvial fan response to an ENSO rainfall event in the el Huasco watershed, northern Chile. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(5), 679-699. <https://doi.org/10.1177/0309133319898994>.
- Cabré, A., Rémy, D., Marc, O., Burrows, K., Carretier, S. (2022). Flash floods triggered by the 15-17th March 2022 rainstorm event in the Atacama Desert mapped from InSAR coherence time series. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05707-y>.
- Garcés, A.*, Zegers, G.*, Cabré, A., Aguilar, G.*, Tamburrino, A.*, & Montserrat, S.* (2022). A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-266>.

Morfo-estratigrafía de un depósito de avalancha de escombros volcánicos del Pleistoceno temprano en la zona central de Chile (Entre los 34°04'S – 70°30'W y 34°06'S – 70°29'W)

Álvaro Carrizo Reyes¹⁻², Marcia Ojeda Carreño³⁻⁴⁻⁵, Germán Aguilar Martorell³

- (1) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Avenida La Plaza 680, Santiago, Chile
(2) Universidad Bernardo O'Higgins, Magíster en Ciencias Químico Biológicas, Ciencias de la Salud, Av. Viel 1497, Santiago, Chile
(3) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Tupper 2007, Santiago, Chile
(4) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Tupper 2069, Santiago, Chile
(5) Universidad de Chile, Advanced Laboratory for Geostatistical Supercomputing, ALGES, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

Los Depósitos de Avalanchas de Escombros Volcánicos (DAEV) presentan un carácter caótico con una alta variación litológica tanto lateral como vertical, y están compuestos por bloques derivados del colapso del edificio volcánico durante erupciones con características explosivas. Estos depósitos volcano-genéticos presentan una morfología típica de avalancha de escombros con montículos, conocidos como *hummocks*, que moldean la topografía del sector donde se depositan. Se pueden reconocer en un radio de decenas de kilómetros desde estratovolcanes en el altiplano del norte de Chile, donde se han documentado y caracterizados para el Pleistoceno tardío a Holoceno (Stern *et al.*, 2007; Godoy *et al.*, 2012). Sin embargo, más al sur, en la zona central de Chile, son escasos los registros, posiblemente debido a las glaciaciones que los han erosionado y un volcanismo más efusivo. Por otra parte, corresponden a depósitos que ante observaciones rápidas podría ser muy similar a un depósito de avalancha con un origen sismo-tectónico, que haya afectado y colapsado relieves compuestos por rocas volcánicas.

Este estudio caracteriza un potencial depósito de avalancha de escombros en la zona central de Chile, para evaluar su génesis volcánica mediante la identificación de litofacies y las relaciones morfo-estratigráficas en un modelo 3D.

El DAEV sobreyace por el norte a una superficie relativamente plana que constituye el techo de una unidad conformada por intercalaciones de lavas andesíticas, brechas volcánicas y niveles piroclásticos (Depósitos de Tobas y Sucesiones Volcánicas). Su posición estratigráfica por encima de la Formación Coya-Machalí, llevó a algunos autores a incluirla dentro de la Formación Farellones, superposición ampliamente distribuida en la región. Sin embargo, desde las primeras dataciones realizadas en esta unidad se identificaron edades más jóvenes (4,6 -1,8 Ma) en relación con la edad de la Formación Farellones 25,2 - 7,4 Ma (Charrier y Munizaga, 1979; Cuadra, 1986; Charrier *et al.*, 2002). Hacia el sur el DAEV está encajado en un valle inciso en las planicies que conforman el techo de los Depósitos de Tobas y Sucesiones Volcánicas y en el sustrato rocoso que constituye la Formación Coya-Machalí. Han sido reportadas edades de cenizas de caída que cubren al DAEV, asignando una edad mínima para el complejo DAEV de 1,3 Ma (Gómez, 2001). La morfología del depósito de ceniza indica que se ciñe a la topografía de *hummocks* por lo que su deposición fue cercana en el tiempo al emplazamiento del DAEV, incluso podría ser un registro del mismo evento eruptivo al encontrarse un contacto neto entre los depósitos, sin una capa de suelo entre el DAEV y el depósito de caída de cenizas.

El DAEV corresponde a un depósito volcanoclástico, con intercalación de niveles sedimentarios centimétricos, de carácter caótico y mayoritariamente matriz soportado, con constantes variaciones laterales y verticales en sus facies sedimentarias y volcánicas. Estas facies en profundidad representan volúmenes lenticulares, relacionables a montículos (*hummocks*) característicos de este estilo de depósitos. Estos montículos son observables también en cortes de camino y en zonas topográficamente altas. Sin embargo, en zonas de menor altitud estos montículos fueron degradados y parcialmente enterrados por sedimentos coluviales y aluviales. Las litofacies son principalmente de carácter masivo, catalogables como tobas de ceniza/lapilli, tobas brechosas y brechas tobáceas debido a variaciones en el porcentaje de matriz presente. La matriz es principalmente de ceniza y material derivado de procesos volcánicos. Se distinguen niveles de tobas de ceniza con presencia de fiammes, agregados de biotita en la matriz y otras texturas de flujos que sugieren un sincronismo entre el colapso del edificio volcánico y una erupción que probablemente detonó el colapso del edificio volcánico. Los centros volcánicos que generaron estos depósitos no se preservan en la actualidad, lo que es esperable dada la erosión glacial plio-pleistocena. En base a las edades disponibles consideramos que el episodio eruptivo que detonó el colapso ocurrió hace aproximadamente 1.3 Ma. Mayores certezas en cuanto a la edad de estos depósitos, y que incluyan nuevos estudios geocronológicos, permitirá reconocer la conveniencia de las agrupaciones geológicas desarrolladas hasta la fecha, precisar las correlaciones a escala regional y su relación con la ubicación de los centros volcánicos.

Palabras Claves: Volcanismo Pleistoceno, Avalancha de detritos volcánicos, Litofacies volcano-sedimentarias, Morfo-estratigrafía volcánica.

Referencias:

- Charrier, R. y Munizaga, F. (1979). Edades K-Ar de volcanitas Cenozoicas del sector Cordillerano del Río Cachapoal (34° 15' Lat. Sur). Revista Geológica de Chile 7: 41-51.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R. y Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile, (33°- 36° S.L.). Journal of South American Earth Sciences 15: 117-139.
- Cuadra, P. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. Andean Geology, (27).
- Godoy, B., Clavero, J., Rojas, C., & Godoy, E. (2012). Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. Andean geology, 39(3), 394-406.
- Gómez, R. (2001). Geología de las unidades vulcanogénicas cenozoicas del área industrial de la mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. Memoria de Título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Stern, C. R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J. E., Lara, L. E., Naranjo, J. A., Parada, M., Skewers, A. (2007). Chilean Volcanoes.

Condiciones paleoclimáticas del Pleistoceno tardío – Holoceno temprano de las cuencas de Imilac – Punta Negra registrado por las firmas magnéticas de los depósitos de paleohumedales

Matías Cortés Fernández¹, Rodrigo Riquelme¹, Héctor Pizarro², Isabel Cartajena³, Patricio de Souza³, Boris Santander⁴

- (1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Libertador General Bernardo O'Higgins 1058, Santiago, Chile
 (3) Universidad de Chile, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Av. Libertador General Bernardo O'Higgins 1058, Santiago, Chile
 (4) Universidad Alberto Hurtado, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Alameda Barroso 10, Santiago, Chile

El Desierto de Atacama ha estado sometido a condiciones de aridez a hiperaridez desde al menos el Mioceno Medio (Rech et al., 2019). Existe consenso de que durante el Pleistoceno tardío-Holoceno temprano (16-9,7 ka cal. AP) las condiciones climáticas en la vertiente occidental de los Andes, entre 18 y 25°S, y sobre 2000 msnm, eran más húmedas que hoy (Quade et al., 2008). A este evento de mayor humedad se le conoce como "Evento Pluvial de los Andes Centrales" (CAPE, por sus siglas en inglés), y se asocia a la formación de depósitos de paleohumedales producto de la descarga de aguas subterráneas en los salares de Imilac (24°S) y Punta Negra (24,5°S) (Quade et al., 2008). Sin embargo, aún falta conocer el contexto geomorfológico de estos depósitos y la extensión que alcanzaron dentro de estas cuencas preandinas. Estos aspectos son claves para entender la magnitud de la somerización de los acuíferos durante el CAPE, y su control sobre los asentamientos humanos del Arcaico en esta región (de Souza et al., 2021). Por otra parte, un estudio detallado de las facies sedimentarias y de las propiedades magnéticas de estos depósitos (temperaturas de curie, susceptibilidad magnética y bucles de histéresis), junto a dataciones ¹⁴C de horizontes orgánicos, permiten estudiar variaciones climáticas menores dentro del CAPE, que pueden ser contrastadas con registros paleoclimáticos de mayor resolución provenientes del estudio de polen en paleomadriguera (de Porras et al., 2017). Dos niveles orgánicos distintivos en los depósitos de paleohumedal permitieron a Quade et al. (2008) definir dos fases húmedas dentro del CAPE (CAPE 1 y 2), separadas por un periodo más árido. En el Salar de Imilac, estos niveles se relacionan a un acuífero que aflora por ~6 km, a lo largo de un canal, que nacía del frente de un abanico aluvial Mioceno. Bajo el nivel orgánico del CAPE 1 se reconocen depósitos aluviales dominados por aportes detríticos con titanomagnetitas y fases oxidadas, con escaso grado de autigénesis. Sobre los depósitos aluviales, los niveles orgánicos están contenidos en un depósito de fango con intercalaciones de arenas, que muestran un incremento en el desarrollo de autigénesis de minerales magnéticos. El nivel orgánico asociado al CAPE 2 se expone también en el margen oriental del Salar de Punta Negra, y se asocia a afloramientos discretos de acuíferos que drenaban desde la Alta Cordillera. Estos depósitos tienen un mayor porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia (k_{fd}%), que aquellos del Salar de Imilac, lo que indica una mayor concentración de minerales magnéticos autigénicos. El estudio de las propiedades magnéticas indica que el nivel aluvial que precede al CAPE, ocurre bajo condiciones relativamente áridas. El alto desarrollo de autigénesis mineral en los depósitos de fango sugiere condiciones climáticas relativamente húmedas durante todo el CAPE, tal como lo sugieren los datos de polen de paleomadriguera. Las diferencias en el desarrollo de autigénesis mineral para los depósitos de fango entre ambos salares puede reflejar las diferencias en los ambientes de depósito.

Palabras Clave: Salar Imilac – Punta Negra, Evento Pluvial de los Andes Centrales (CAPE), Depósitos de paleohumedal, Propiedades magnéticas.

Agradecimientos: Agradecimientos al proyecto FONDECYT N°1181627 de I. Cartajena, quien financió este proyecto, y a la Unidad de Equipamiento Científico- MAINI-UCN, donde se realizaron los análisis magnéticos.

Referencias:

- de Porras, M. E., Maldonado, A., De Pol-Holz, R., Latorre, C., & Betancourt, J. L. (2017). Late Quaternary environmental dynamics in the Atacama Desert reconstructed from rodent midden pollen records. *Journal of Quaternary Science*, 32(6), 665-684.
- de Souza, P., Cartajena, I., Riquelme, R., Maldonado, A., de Porras, M. E., Santander, B., ... & Díaz, L. (2022). Late Pleistocene–Early Holocene human settlement and environmental dynamics in the southern Atacama Desert highlands (24.0° S–24.5° S, Northern Chile). *Geoarchaeology*, 37(1), 13-31.
- Quade, J., Rech, J., Betancourt, J. L., Latorre, C., Quade, B., Rylander, K. A. y Fisher, T. (2008). Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary Research*, 69, 343–360.
- Rech, J. A., Currie, B. S., Jordan, T. E., Riquelme, R., Lehmann, S. B., Kirk-Lawlor, N. E., ... & Gooley, J. T. (2019). Massive middle Miocene gypsic paleosols in the Atacama Desert and the formation of the Central Andean rain-shadow. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 184-194.

Hypotheses on the formation of the Loa River valley, N Chile

Marcelo H. García Godoy¹, Nicolás Blanco², Teresa Jordan³, Andrew Tomlinson²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 (2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile
 (3) Cornell University, Earth & Atmospheric Sciences, Ithaca, NY, 14853, NY, USA

1. Introduction

River patterns are largely determined by the interplay between tectonics and climate. Secondly, fluvial courses can be influenced by bedrock lithology, volcanism, damming, glacier retreat and karst dissolution. The normal drainage patterns are dendritic-centripetal but, depending on the climate and slope (which is controlled finally by tectonics), these can vary to parallel, radial, rectangular (or trellis) or others. Growth of the drainage system results from multiple river captures, and two fluvial capture types are recognized: capture by upstream erosion and capture by overflow. The first type is the most common and well-studied.

The Loa River, located in the Andes of northern Chile, with a length of 440 km and conspicuous “U” shape (Fig. 1), is the longest river in the country, but additionally, it is the longest on the Pacific slope of the Andes. The river and its groundwater system are very important for life, natural resources and mining activity. The lower reach of the river is located in the hyperarid core of the Atacama Desert and is the only exoreic stream in a 730 km-long N-S segment of the Andean forearc that is otherwise endorheic. Hyperarid conditions were established by the end of the Middle Miocene (ca. 12-11 Ma), following a semiarid period (eg., Rech et al., 2019).

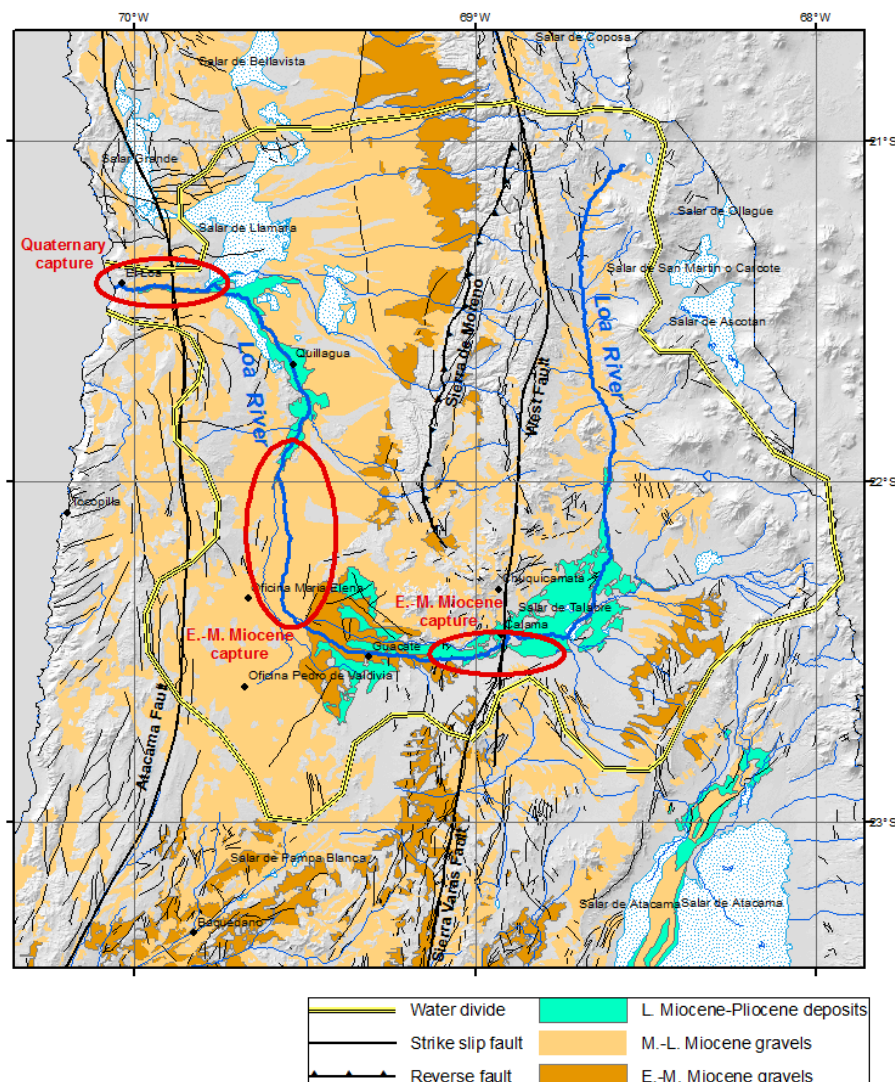


Figure. 1. Map of the Loa River area in northern Chile, showing the present-day drainage, water divide, main faults, salars, and distribution of the Miocene to Pliocene alluvial gravels and lacustrine-palustrine-evaporitic deposits (from SNGM, 2002). Major fault systems which likely influence the course of the Loa River are traced in simplified fashion: among these, the reverse fault system along the western border of the Sierra de Moreno block and the West and Sierra de Varas strike-slip faults. Note that the Late Miocene to Pliocene lacustrine-palustrine-evaporitic deposits of the Salar de Llamara-Quilagua and Guacate-Calama areas distribute along a proto-Loa valley relatively similar to the present-day Loa valley.

Whereas the stratigraphy, tectonics, paleoclimate, and groundwater of certain areas of the Loa River basin have been studied, the geological origin of the valley system and its "U" shape is unclear. Recently, the dynamics of fluvial capture have been suggested for the lowermost part of the valley system, in the Coastal Cordillera-Central Depression, where the current Loa canyon is up to 600 m deep (Ritter et al., 2018; Jordan et al., 2022; Fig. 1). There, the surface of the Salar de Llamara is at 770-790 m a.s.l. and based on the Neogene stratigraphy of the Salar de Llamara-Quillagua area, a depocenter lake system in endorheic conditions existed, with water supplied from the south, associated with a paleo-Loa River. Ritter et al. (2018) interpreted the presence of a large and persistent lake associated with several pluvial stages in the Loa catchment during the Pliocene and Pleistocene. Contrary, the depocenter lake system has been related to extremely arid, standing-water and salar conditions, with limiting water and sediment, during the Late Miocene and Pliocene, from ca. 9 to 2.6 Ma (Vásquez et al., 2018; Jordan et al., 2022). Between 2.6 and 1.7 Ma the previously endorheic drainage changed sufficiently to stimulate broad erosion, and by 1 Ma, the drainage opened to the Pacific Ocean, forming the current Loa canyon (Jordan et al., 2022; Fig. 1). On the other hand, the fluvial capture history in the middle and upper segments of the Loa River valley, in the Central Depression and Precordillera, have not been studied.

2. Hypotheses

The general hypothesis is that the Loa River valley originated by multiple fluvial capture events in which a drainage system, operating closer to the Pacific, conquered a drainage system, or several systems, operating in the higher Andes. Among these multiple capture events, the three most important were: one in the Quaternary and two during the Early-Middle Miocene. The Quaternary capture was already documented and discussed above. The older captures would have occurred in the Central Depression and Precordillera prior to 9-7 Ma, because the Late Miocene to Pliocene lacustrine-palustrine-evaporitic deposits of the Salar de Llamara-Quillagua and Guacate-Calama areas distribute along a proto-Loa valley relatively similar to the present-day Loa valley (Fig. 1; SNGM, 2002). In the first area, the Late Miocene-Pliocene Quillagua and Soledad formations include diatomites and siltstones/sandstones cemented by gypsum and halite (Vásquez et al., 2018; Jordan et al., 2022), whereas in the second, the ca. 7-3 Ma Opathe Formation include palustrine limestones, calcareous detrital rocks and diatomites (Jordan et al., 2015; Tomlinson et al., 2018). The Middle Miocene to Pliocene alluvial and lacustrine-palustrine deposits of the Jalquinche and Opathe formations represent an ancient Loa hydrologic system and imply that the current valley in this part existed at ca. 7-8 Ma. Pinching out of the Opathe Formation in the Guacate area suggests a basement high there, and it is likely a groundwater connection existed between the Calama-Guacate hydrologic system and the María Elena-Quillagua river segment at this time.

2.1. Connections within the Central Depression (linking sectors from Quillagua to María Elena)

It is interpreted that a major fluvial capture took place in the lower-middle segment of the Loa River valley, when a drainage system operating in the Salar de Llamara-Quillagua basin captured a drainage system operating near María Elena and Guacate. In the Salar Grande, Salar de Llamara and Quillagua basins (Fig. 1), the younger-than-ca. 9 Ma deposits were accumulated in a depression that probably existed from the Oligocene to Middle Miocene and linked to an outlet to the ocean Pacific. In effect, alluvial-fluvial deposits of this age are present in paleovalleys and depressions of the eastern Coastal Cordillera (Quebrada Amarga Beds) and western Coastal Cordillera (Cañón del Loa Beds and lower Gravas de Alto Hospicio). In the east, the alluvial Quebrada Amarga Beds are present under ca. 750-850 m a.s.l., underling the Hilaricos/Quillagua formations, with a thickness lower than 240 m and clasts sourced from the Central Depression and Precordillera (Vasquez et al., 2018). In the west, the Oligocene conglomerates have rounded and imbricated clasts; the clasts have lithologies similar to the Coastal Cordillera rocks although some of them could come from the Central Depression and Precordillera as well. Southwest of the Salar Grande, north Caleta Guanillo del Norte, an E-W deep paleovalley with at least 2-3 km width and its current base at ca. 200 m a.s.l., is filled by deposits of the Oligocene Cañón del Loa Beds (Vasquez et al., 2018), which are covered by Early-Middle Miocene alluvial deposits forming the level near of the Central Depression surface. Immediately north of the Loa canyon, cerro Paiquina sector, the Cañón del Loa Beds deposits fill a paleovalley, whose base is at 300-350 m a.s.l. (Vasquez et al., 2018). All of this suggests that during the Middle Miocene existed a depression zone in the Quillagua area which had a high erosion potential to expand laterally the drainage network.

Through the María Elena-Guacate area, located at 1200 to 1500 m a.s.l., the position of the up-stream portion of a pre-capture paleo-drainage is inferred from the distribution of Oligocene(?) to Middle Miocene alluvial deposits, which are present along an approximately E-W paleo-valley with 15 to 40 km width (SNGM, 2002; Fig. 1). The position of the down-stream segment of the María Elena-Guacate paleovalley is uncertain; it is probable that coeval alluvial deposits are present below younger units in some paleo-valleys of the Coastal Cordillera between María Elena and Tocopilla, representing the filling of the lower stream segment of the María Elena-Guacate paleovalley.

Fluvial capture from the Quillagua to María Elena-Guacate can be due to the presence of the Sierra de Moreno block located in the westernmost part of the Precordillera. The block is NNE-SSW-oriented, attains progressively greater altitudes towards the north and terminates to the south in the area located to the north of Guacate. It has ca. 120 km long by 15 km width, and reaches its maximum height (ca. 3670 m a.s.l.) at 21.43°S, at the same latitude of the current Loa canyon in the Coastal Cordillera. The block is bounded on the west by folds and east dipping reverse faults. Its main age of uplift is disputed, but ranges from middle Cretaceous to Eocene, with an important Neogene history due to differential uplift of the Altiplano with respect to the Central Depression and formation of the western slope of the Central Andean Plateau. Its long-lived presence and western position along the strike in the Precordillera (respect to the valley systems developed to the north and south) contributed to increase the regional topographic slope, which is compatible with the Middle Miocene depression zone that existed in the Quillagua area and the high erosion potential to expand laterally the drainage network. In addition, the NNE-SSW orientation and southward structural growth of the Sierra de Moreno forced the drainage to grow to the south. Thus, the fluvial capture in the María Elena-Guacate area probably occurred coeval with an Early-Middle Miocene reactivation of the Sierra de Moreno reverse faults and a phase of uplift of the Altiplano.

2.2. Connections within the Precordillera (linking sectors from Guacate to Calama)

Another major capture occurred in the Precordillera, when the drainage system existing in the María Elena-Guacate area captured a drainage system that operated in the Calama area. The Calama basin is composed mainly of moderately consolidated sedimentary rocks of Oligocene to Pliocene age and its depocenter has shifted in location at least four times (Jordan et al., 2015; Tomlinson et al., 2018). The Oligocene-Early Miocene Calama and Yalqui formations conglomerates, breccias, sandstones, siltstones and scarce volcanic-associated strata reach exposed thicknesses of ~1000 m, inferred subsurface thicknesses of up to 2,500 m and occur mostly in the southern and eastern part of the Calama basin, along the trace of modern Loa River valley. Fine-grained alluvial and fluvial facies of the Jalquínche and Lasana formations spread widely across the basin in the Early and Middle Miocene.

Important faulting, folding and exhumation in the north Chilean Precordillera occurred between 45 and 35 Ma (Maksaev and Zentilli, 1999; Tomlinson et al., 2018). Subsequently, in the Late Oligocene to Early Miocene (31-17 Ma), north of Calama, the vertical West fault accommodated an important sinistral displacement of 35 km (Tomlinson et al., 2018). South of Calama, the Sierra de Varas fault is a major vertical strike slip structure on which a Paleogene-early Neogene sinistral movement of 15 km has been determined (Niemeyer and Urrutia, 2009). The connection between the Sierra de Varas fault and West fault has not been studied, but both faults are coincident in their along-strike position and have the same kinematics. The movements on these regional faults during the Miocene would have effects on the drainage systems and their evolution.

To the south of the Loa River basin, the Baquedano basin is NE-elongated and has a relatively small drainage area size. The extensive distribution of Late Oligocene? to Middle Miocene alluvial gravels (SNGM, 2002; Fig. 1) shows that the basin/valley is relatively old. The NE end of this drainage system approximates the present-day Loa River catchment area. Restoration of the West and Sierra de Varas faults suggests that in the Oligocene the Calama basin hydrologic system may have been connected to the NE end of the Baquedano drainage system. Oligocene-Early Miocene sinistral offset on the West and Sierra de Varas faults transported to the south the Baquedano drainage system, disconnecting it from the Calama basin and present-day Loa River catchment. This allowed later capture of the paleo-Guacate-Calama valley to form the latest Miocene to Quaternary (7-0 Ma) Loa River valley (Fig. 1). The age of this third major capture is older than the latest Miocene and younger than the sinistral movement on the West-Sierra de Varas Fault system, i.e. post-Early Miocene (post-20-17 Ma). Therefore, within the time constraints, it is possible that the two older major captures were in part contemporaneous.

3. Summary

The Loa River valley was formed by multiple fluvial capture events, operating from the Pacific to the High Andes. Fluvial captures were forced mainly by tectonic processes, with vertical and horizontal movements, but all were favored by a hyperarid climate under which erosion is slow. The youngest capture occurred in the Coastal Cordillera between 1.7 and 1 Ma when a stream that reached the Pacific captured the Salar de Llamara-Quillagua depocenter lake system. The Late Miocene to Pliocene lacustrine-palustrine-evaporitic deposits of the Salar de Llamara-Quillagua and Guacate-Calama areas distributed along a proto-Loa valley relatively similar to the present-day Loa valley. An older second major capture, in the lower-middle segment of the Loa valley, occurred prior to ca. 9-7 Ma, when a drainage system in the Salar de Llamara-Quillagua captured a drainage system operating in María Elena-Guacate. The uplift of the Sierra de Moreno increased the regional topographic slope and forced the drainage to grow to the south during the Early-Middle Miocene. A third major capture occurred in the Precordillera, when a drainage system existing in the Guacate area captured the drainage system of the Calama basin area. This was accomplished by sinistral displacement on the West and Sierra de Varas faults, that transported to the south the Baquedano drainage system, detaching it from the Calama basin, which was then captured by the paleo-Guacate-Calama valley to form the Late Miocene to Quaternary Loa River valley. The age of this third major capture was likely Early-Middle Miocene. In consequence, it is possible that the two last mentioned major captures were in part contemporaneous.

Keywords: Miocene, Andes, Fluvial capture, Atacama Desert.

References:

- Jordan, T.E., Herrera, C., Kirk-Lawlor, N., Godfrey, L., 2015. Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile: *Geosphere*, v. 11, no. 5, p. 1438-1474, doi: [doi:10.1130/GES01176.1](https://doi.org/10.1130/GES01176.1).
- Jordan, T., Quezada, A., Blanco, N., Jensen, A., Vásquez, P., Sepúlveda, F. (2022). Paleoenvironmental Evolution of a Forearc in Response to Forcings by Drainage, Climate, Volcanism, and Tectonics: The Quillagua Depocenter, Chile. *Lithosphere*, 2022(1), 1024844.
- Maksaev, V.; Zentilli M.; 1999. Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, northern Chile: implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Explor. Mining Geol.* 8:65-89.
- Niemeyer, H.; Urrutia, C.; 2009. Transcurrencia a lo largo de la Falla Sierra de Varas (Sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko), norte de Chile. *Andean Geology* 36 (1): 37-49.
- Rech J., B. S. Currie, T. E. Jordan et al., 2019. Massive middle Miocene gypsic paleosols in the Atacama Desert and the formation of the Central Andean rain-shadow, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 506, pp. 184–194.
- Ritter, B., Binnie, S.A., Stuart, F.M., Wennrich, V., Dunai, T., 2018. Evidence for multiple Plio-Pleistocene lake episodes in the hyperarid Atacama Desert. *Quat. Geochronol.* 44, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2017.11.002>.
- SNGM, 2002. Mapa Geológico de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, N° 75. Escala 1:1.000.000. 1 mapa en 3 hojas.
- Tomlinson, A.; Blanco, N.; Dilles, J.; Maksaev, V.; Ladino, M.; 2018. Carta Calama, Región de Antofagasta, Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, vol. 199, pp. 1–217. Map scale 1:100,000.
- Vásquez, P., Sepúlveda, F., Quezada, A., Aguilera, S., Franco, C., Blanco, N., 2018. Cartas Guanillos del Norte y Salar de Llamara, Regiones de Tarapacá y Antofagasta, 1:100,000 scale. SERNAGEOMIN, Chile.

What Controls Bedrock Valley Width? Investigating the role of mobile vs. persistent talus piles using field data and numerical modeling

Abigail Langston¹

(1) Kansas State University, Geography and Geospatial Sciences, 920 North Martin Luther King Drive, Manhattan, Kansas 66506, EE.UU.

Wide bedrock valleys are carved when rivers laterally erode and widen valleys more rapidly than vertically incising. Understanding how bedrock canyons evolve into wide bedrock valleys is a frontier topic in geomorphology. A more nuanced and quantifiable framework for describing and predicting bedrock valley widening through time is necessary for geomorphic applications such as numerical modeling of strath terrace formation – former wide bedrock valleys – and hillslope–channel coupling. Bedrock valley widening occurs by first laterally eroding bedrock valley walls, leading to eventual collapse of overlying bedrock material. This is followed by the evacuation of the collapsed talus pile away from the wall after which the valley can continue widening. The mobility vs. persistence of collapsed talus piles plays a role in valley widening rate and ultimate valley width. Highly persistent talus piles that cannot be evacuated protect the valley wall and halt valley widening, while mobile talus piles can be rapidly transported away from the valley wall allowing for uninterrupted valley widening.

The free-flowing Buffalo River in northwest Arkansas is an ideal field site for exploring the effects of mobile vs. persistent talus piles on valley width. We have data from 40 locations in both wide and narrow valleys along the Buffalo River. We measured talus and bedload grain size, talus pile volume, valley wall height and channel morphology. We found that the wide valleys tend to have talus blocks that spans a wide range of sizes but are overall smaller than talus blocks in the narrow valleys. Talus in the narrow valleys is consistently larger with little variation in size. We calculated bed shear stress at each site location for three different sized floods. Our calculations show that talus blocks at many locations in the narrow valleys cannot be transported by a 1000-year flood, while talus at nearly all locations in the wide valleys is potentially transported. We conclude that the persistence of talus piles that protect bedrock valley walls is controlled by the block size of collapsed bedrock wall material relative to stream competency. This conclusion is supported by a set of numerical models that demonstrate that the block size of collapsed bedrock walls is by itself a strong control on valley width.

Keywords: bedrock river, sediment transport, fluvial geomorphology, strath terrace.

Financing: National Science Foundation, EEUU.

Unraveling past atmospheric circulation during the last deglaciation and the current interglacial over southern South America through the provenance of long-range particles of Pampean loess

Diego Montecino Jara¹⁻², Victoria Nogués¹⁻², Renata Coppo¹⁻², Gabriela Torre¹⁻², Nicolás Cosentino³, André Sawakuchi⁴, Edinei Koester⁵, Diego M. Gaiero¹⁻²

(1) Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina

(2) CICTERRA, UNC-CONICET, Av. Vélez Sarsfield 1699, Córdoba, Argentina

(3) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza dell'Ateneo Nuovo, 1 - 20126, Milan, Italy

(4) Luminescence and Gamma Spectrometry Laboratory (LEGaL), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, São Paulo, Brazil

(5) Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Brazil

Atmospheric dust (AD) plays a crucial role in Earth's climate system, impacting global climate by interacting with clouds and radiation. Moreover, AD helps mitigate atmospheric CO₂ levels by alleviating iron limitation and enhancing primary productivity in the oceans. In the region of southern South America (SSA), the transport of AD is primarily influenced by the SubTropical Jet stream (STJ) and the Southern Westerly Winds (SWW). One significant sedimentary archive for studying paleoclimatic changes is the Pampean loess, located in Argentina. This extensive loess deposit, the largest south of the Equator, provides valuable insights into past atmospheric circulation, including variations in the origin and production rates of AD.

To enhance our understanding of paleo-atmospheric circulation in the Southern Hemisphere, we evaluate dust provenance through Nd and Sr isotopes for the fraction of sediment representative of long-range transport (<20 µm) of two loess sections cropping out across the Pampean region in central Argentina. The depositional ages of these sections, estimated to be approximately 17,000 to 3,000 years ago, were determined using optically stimulated luminescence (OSL) dating of sand-sized quartz grains. By comparing the isotopic composition of the loess samples with potential dust sources in SSA, we found that the fraction smaller than 20 µm: (1) consists of dust from multiple sources; (2) is not significantly influenced by dust from the Northern Puna region; (3) exhibits isotopic values falling within the range defined by the compositional trend of southern-central western Argentina (S-CWA), northern Patagonia, and southern Puna; and (4) shows a closer isotopic affinity to the southern Altiplano region. This suggests that, during the studied time period, the southern Altiplano served as the primary source of dust particles smaller than <20 µm in the Pampas, followed by S-CWA, northern Patagonia, or southern Puna.

To assess changes in the isotopic contributions from each source over time and identify variations in AD provenance, we employed an isotope mixing model called SIMMR (R package). This model solves mixing equations using "n" isotopes and provides a unique solution considering a maximum of "n+1" sources. In accordance with the primary atmospheric circulation systems governing sediment transport from each region, we combined the southern Altiplano, northern Puna, and southern Puna into a unique source termed Puna-Altiplano Plateau (PAP), associated with the STJ circulation. Similarly, S-CWA and northern Patagonia were combined due to their association with the SWW. The SIMMR model revealed a 65-89% probability that the sediment fraction smaller than 20 µm was predominantly derived from PAP. Additionally, we calculated the source contributions for each analyzed sample to investigate the evolution of each potential source area's contribution to the loess sections. Our findings indicated substantial contributions (~56-74%) from PAP throughout the studied time period, with higher values (67% and 74%, respectively) during the transition from the last deglaciation (19-15 ka) to the Antarctic Cold Reversal (14-12 ka).

To gain a comprehensive understanding of the past atmospheric circulation in SSA, further investigations employing alternative provenance proxies should be conducted. These studies will provide insights into the temporal variability of different source contributions to the Pampean loess, contributing to our overall understanding of the region's paleoclimatic dynamics.

Keywords: Pampean loess, provenance, radiogenic isotopes, Atmospheric dust, unmixing model.

Grain size distribution of Pampean loess during the Late Holocene - Late Pleistocene: Inferences on its origin, transport, and paleoclimatic implications

Diego Montecino Jara¹⁻², Victoria Nogués¹⁻², Renata Coppo¹⁻², Gabriela Torre¹⁻², Nicolás Cosentino³, Diego M. Gaiero¹⁻²

(1) Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina

(2) CICTERRA, UNC-CONICET, Av. Vélez Sarsfield 1699, Córdoba, Argentina

(3) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza dell'Ateneo Nuovo 1 - 20126, Milan, Italy

Loess deposits provide valuable insights into the behavior of dust source areas under various climatic and temporal conditions. By identifying the active potential source areas in the past, we can infer changes in atmospheric circulation and climatic conditions. In the Southern Hemisphere, the Pampean loess serves as a significant continental record of atmospheric dust, transported by two predominant zonal wind systems: the Southern Westerly Winds (SWW) and the SubTropical Jet (STJ).

To contribute to the ongoing discussion on the origin, transport mechanisms, and paleoclimatic implications of the Pampean loess, this study presents and compares the results of a comprehensive analysis of grain size distributions. We examined modern atmospheric dust samples alongside two loess profiles accumulated during the Late Holocene - Late Pleistocene period in the Chaco-Pampean plain of Argentina.

In general, the analyzed samples displayed two or three distinct modes in their grain size distributions. Clay, silt, and sand contents, along with the Twin Peaks (TP) and Grain Size (GS) Index, which serve as proxies for wind intensity, were calculated based on the grain size data. By employing an End Members Analysis (EMA), the grain size distributions of the two loess profiles were separated into subpopulations, which were then compared with the results obtained from the analysis of modern dust samples. The findings indicate that the observed multimodal grain size distribution in the studied sections resulted from contributions from multiple dust sources. By examining the temporal and spatial changes in clay, silt, and sand contents, as well as TP and GS indices, we can identify: 1) a unique source with a multimodal grain size distribution; 2) changes in the activity (activation or deactivation) of different source areas and/or reflecting the distance to potential sources; and 3) changes in the intensity of the primary wind systems responsible for sediment transport. TP and GSI indices demonstrate an increasing trend with depth, reaching their minimum values during the late Holocene and Marine Isotopic Stage (MIS) 3, while the highest values are associated with the Last Glacial Maximum (LGM).

The EMA conducted on the loess profiles and modern dust samples suggests that the fine-grained population present in both the loess samples (EM1) and modern atmospheric dust (EM1*) represents contributions from distant sources (Altiplano-Puna). Conversely, the coarser-grained population identified in both the loess (EM2) and modern dust (EM2*) is likely derived from closer sources (S-CWA - Mar Chiquita - Northern Patagonia). A third grain-size population identified in the loess (EM3) can be linked to the transport from distant sources (similar to the modern dust's end member EM3*), as well as the formation of clay minerals resulting from weathering in both the source regions and accumulation sites.

To further enhance our understanding, additional studies incorporating X-ray diffraction and isotopic analyses of Nd, Sr, and Pb in different sediment fractions are necessary. These studies will help clarify the origin of the last grain-size population and provide further validation of the proposed provenance results based on the comparison of end members in the loess and modern dust samples.

Keywords: grain size, modern dust, Pampean Loess, South America, Pampas.

Escalas de tiempo de respuesta sedimentaria de las cuencas de Chile Central a los efectos de cambios de clima

Maíra Oneda Dal Pai¹, Juan Luis García¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, Chile

Los sistemas de enrutamiento de sedimentos, o *sediment routing systems* (SRSs), están constantemente transportando sedimentos desde las zonas de erosión (*source*) hasta las zonas de deposición (*sink*). Cambios en las condiciones ambientales de la zona de erosión (ej. clima, tectónica, actividad antrópica) modifican las características de los sedimentos, resultando en la transmisión de una señal ambiental que se propaga por el SRS. Todavía, la transmisión efectiva de esta señal depende de dos factores: (i) el tiempo de duración del cambio generado en la zona de erosión, y (ii) la existencia de *sinks* temporales a lo largo de la zona de transferencia que amortigüen o modifiquen la señal. En el presente los glaciares en el mundo se encuentran bajo un proceso de deshielo, y la magnitud de esta tendencia negativa es desconocida pero posiblemente inédita en el Holoceno. La transición hacia condiciones climáticas más cálidas en las cordilleras englacadas desencadena profundos desequilibrios ambientales en la zona de erosión que incluyen la intensificación de los procesos paraglaciales (i.e. movimientos de masa, caídas de rocas, acumulación de talud, etc.). Este estado transitorio favorece la remoción de masa y el retrabajo de sedimentos inconsolidados, que eventualmente son exportados como una señal por el sistema fluvial. En ese contexto, entender cómo y a qué temporalidades son transportados los sedimentos por los SRSs es relevante para comprender mejor cómo los cambios climáticos en las zonas de erosión se transmiten hacia zonas más distantes de las cuencas. Se postulan entonces las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el registro sedimentario del último periodo glacial en Chile central? ¿Cuál es la temporalidad de propagación de las señales ambientales generadas por cambios climáticos durante este periodo a lo largo de los SRSs de Chile Central? ¿La señal es transmitida de manera preservada, o más bien es alterada? Se hipotetiza que los registros sedimentarios en depósitos fluviales son clave para poder responder tales preguntas. Se plantea como área de estudio la cuenca del río Limarí, por su geomorfología y geología favorable para el análisis sedimentológico y cronológico. Se propone el análisis de la varianza de la concentración de $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}/^{14}\text{C}$ en los sedimentos del río, desde su curso superior hasta su nivel de base en el océano, para justamente entender cómo la señal cosmogénica de la zona de erosión es transmitida a lo largo de la cuenca hasta el Pacífico. También, se harán muestreos en las terrazas fluviales con OSL a lo largo del río para verificar que tipos de señales se están registrando, y cuáles son los periodos de señal que logran transmitirse por el SRS. La investigación tiene alto potencial de aporte al ayudar determinar el tipo y tiempo de respuesta de las cuencas hidrográficas en sus partes altas, medias y bajas al cambio climático/glacial actual, ya que son necesarios para el diseño y aplicación de políticas públicas adecuadas al nuevo escenario hidro-geomorfológico del siglo XXI. Se espera poder discutir resultados preliminares de la investigación en la instancia del congreso.

Palabras Clave: Sistemas de enrutamiento de sedimentos, transporte de sedimentos, señales ambientales, cambio climático.

Cronoestratigrafía de Paleohumedales en el núcleo hiperárido del Desierto de Atacama en el Cuaternario Tardío

Héctor Orellana Cortés¹⁻²⁻³⁻⁴, Claudio Latorre²⁻⁴, Juan Luis García¹, Estefanía Quilaman¹⁻³, Carlos Marquardt⁵⁻⁶, Jay Quade⁷

- (1) Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile
(2) Instituto de Ecología & Biodiversidad (IEB), casilla 653, Santiago, Chile
(3) Centro UC Desierto de Atacama, Pontificia Universidad Católica de Chile
(4) Núcleo Milenio de Ecología Histórica Aplicada para los Bosques Áridos
(5) Departamento de Ingeniería en Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile
(6) Departamento de Estructuras y Geotecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile
(7) Department of Geoscience, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA

El núcleo hiperárido del Desierto de Atacama, se extiende a lo largo de la Depresión Central del norte de Chile, entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes (18°-27°S) (Quezada et al., 2010; Gayo et al., 2012), a una elevación media de 2.000 m s.n.m. Aquí las precipitaciones son básicamente nulas (<10 mm/a), lo que le confiere a esta área su carácter hiperárido (Houston & Hartley, 2003). El cual se ha sugerido que ha permanecido en esas condiciones desde al menos el Oligoceno ~25 Ma (Dunai et al., 2005), por lo que se le considera el desierto más árido del mundo. Esto se debe a varios factores, como la barrera orográfica que genera los Andes, la cual dificulta los advección tropical y subtropical del este; la influencia del anticiclón del Pacífico Sur y la Corriente de Humboldt, que favorece la inversión térmica, impidiendo el ingreso de humedad del Pacífico; y su latitud en el globo terrestre, el cual favorece el descenso de la celda de Hadley, generando altas presiones (Garreaud, 2009). A pesar de estos factores, es importante mencionar que, durante el verano austral en la cordillera de los Andes en estas latitudes, las precipitaciones se hacen presente, afectando el nivel freático regional y las quebradas que descendiente altitudinalmente al núcleo hiperárido, favoreciendo a escala milenial la alternancia entre períodos húmedos y áridos, propiciando durante los eventos de mayor pluviosidad, la generación de humedales y corredores biológicos, hoy inexistente en el Desierto de Atacama (Rech et al., 2002; 2003; Latorre et al., 2003; 2005; 2006; Quade., 2008; Sáez et al., 2016; Pfeiffer et al., 2018; Tully et al., 2019; Workman et al., 2020). Es por eso, que estudiar la evidencia en el registro geológico, que dejan los paleohumedales como depósitos, podemos tener la inferencia de las fases húmedas y áridas que afectaron el desierto de Atacama, específicamente en este estudio en el extremo sur del mismo (24°-27°S). Además, es importante mencionar que, si bien existen estudios en la región, la mayoría no se centran en el núcleo hiperárido y son reconstrucciones paleoclimáticas que no son continuas tanto temporal como espacialmente, lo que no permite comprender e inferir la variabilidad climática que afecta a la región de Atacama (Orellana et al., 2023). Lo que sin duda abre una oportunidad, para generar estudios, como es en este caso la obtención de registros proxies de paleohumedales, que nos permiten expandir geográfica y temporalmente nuestro entendimiento de las fases de humedad y de aridez, además de contribuir a una mejor comprensión de cómo operaron los mecanismos climáticos a escala milenial, en latitudes medias. Para lo cual se describieron y muestrearon perfiles estratigráficos, en las quebradas de Pan de Azúcar y Agua Verde, en la región de Atacama, a las cuales también se le realizaron un levantamiento geológico y geomorfológico. En los perfiles estudiados de dichas quebradas, se realizó una descripción estratigráfica y se muestrearon carbonatos y material sedimentario, para la datación por radiocarbono. Lo estratos seleccionados corresponden a capas limosas y limo-arcillosas de color verde pálido a blanco (margas de humedales), los cuales caracterizan a los pantanos denominado margas de humedales (Pigatti et al., 2014). Además, se muestrearon la parte superior e inferior de cada unidad estratigráfica, para restringir las edades del depósito. No se muestrearon capas orgánicas, por la carencia de estas. Por otro lado, las unidades estratigráficas muestreadas, fueron llevadas y procesadas en el laboratorio de la Universidad de Arizona, en donde fueron convertidas en grafito y posteriormente fueron pasadas por personal del laboratorio, en el espectrómetro de masas con acelerador (AMS), para la datación con ¹⁴C. Mientras que un par de muestras fueron enviadas al laboratorio de DirectAMS, USA.

Para terminar, es importante destacar que los depósitos de paleohumedales estudiados comprenden fechas que van entre los 50 a 15 ka. Dentro de los cuales se obtuvieron los siguientes períodos húmedos 47.8, 39, 33, 17.2 y 15.3 ka cal AP. Estos períodos húmedos se han asociado con fases contemporáneas a los paleolagos bolivianos, como el Inca Huasi (46-47 ka) y el Tauca (18,1-14,1 ka), así como con una gran fase húmeda llamada CAPE I (17,5-14,1 ka). Todas estas edades se relacionan con un aumento en la precipitación de verano (origen tipo monzón), excepto las edades de 39 y 33 ka, que se propone que provienen de los vientos del oeste (precipitación de invierno).

Palabras Clave: Desierto de Atacama, Paleohumedales, Paleoclima, Proxy, cronoestratigrafía.

Financiamiento: BECA ANID DOCTORAL. FONDECYT 1191568.

Agradecimientos: ANID FONDECYT 1191568, Centro del Desierto de Atacama UC y el Instituto de Geografía UC. También al Dr. Jay Quade y su laboratorio en el Departamento de Geociencia de la Universidad de Arizona, USA.

Análisis morfométrico de los drumlins y otras geoformas subglaciales del lóbulo glacial Seno Otway en Patagonia sur

Hernán Pezoa-Quevedo¹⁻²⁻³, Rodrigo L. Soteres²⁻³, Inti González²⁻⁴, Esteban A. Sagredo⁵⁻⁶, Michael R. Kaplan⁷

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago, Chile

(2) Universidad de Magallanes, Centro de investigación GAlA-Antártica, Punta Arenas, Chile

(3) Centro Internacional Cabo de Hornos (CHIC), Puerto Williams, Chile

(4) Centro de estudios del Cuaternario, Fuego-Patagonia y Antártica (CEQUA), Punta Arenas, Chile

(5) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, Chile

(6) Estación de Investigaciones Multidisciplinarias Patagonia UC, Chile

(7) Columbia University, Lamont-Doherty Earth Observatory, New York, USA

Los drumlins han sido objeto de análisis morfométricos recurrentes en las últimas décadas, lo que ha contribuido significativamente a expandir nuestro conocimiento de los procesos glaciales que ocurren en la interfaz lecho-hielo, así como la dinámica de los glaciares en el pasado. Sin embargo, hasta la fecha, escasos estudios enfocados en las características morfométricas de estas geoformas han sido llevados a cabo en el hemisferio sur.

En el extremo sur de Patagonia, en América del Sur, existen numerosos drumlins y geoformas subglaciales en perfecto estado de conservación que ofrecen la oportunidad de testear hipótesis sobre la génesis de estas geoformas, así como su significado paleoglaciológico.

En este estudio realizamos un análisis morfométrico de las diversas geoformas subglaciales del lóbulo Seno Otway, incluyendo parámetros morfométricos básicos y complejos, tales como “Relación de Elongación” (L/W), “Índice de Sinuosidad” ($ISIN$) e “Índice de Circularidad” ($ICIR$). Además, exploramos estadísticamente las potenciales correlaciones entre parámetros morfométricos y variables glaciológicas del Manto de Hielo Patagónico inferidas a partir de modelos numéricos previos. La identificación y mapeo fue realizado por medio de modelos de elevación digital e imágenes satelitales a través del Sistema de Información Geográfica ArcGIS, mientras que los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software R.

Este estudio incluyó 1315 geoformas entre drumlins y otras geoformas subglaciales variadas que se agrupan en los campos Fitz Roy y Laguna Cabeza de Mar, al norte y este del Seno Otway, respectivamente. La totalidad de geoformas exhiben valores promedio de ~780 m de longitud para el eje mayor y ~230 m para el eje menor, un área media de ~155 m² y una altura media de ~9 m. La relación de elongación (L/W) muestra una tendencia ascendente en la zona central del campo Laguna Cabeza de Mar y en las áreas adyacentes al oeste del Canal Fitz Roy, donde se encuentran las geoformas de mayor elongación, disminuyendo paulatinamente a los extremos donde aparecen morrenas “ribbed” y otras geoformas. El $ISIN$ presenta valores mínimos en los campos de drumlins y máximos en las áreas dominadas por morrenas “ribbed”. Finalmente, $ICIR$ alcanza valores máximos en el norte de Seno Otway, donde la topografía parecer ganar altura paulatinamente.

La distribución espacial de los índices morfométricos sugiere un continuo geomorfológico en la evolución de las geoformas subglaciales desde morrenas “ribbed” en zonas proximales hasta drumlins en zonas distales, respecto al flujo de hielo inferido. Este patrón geomorfológico ha sido observado en otras partes del hemisferio norte, no obstante, algunas singularidades invitan a seguir investigando. Los análisis estadísticos preliminares muestran correlaciones de bajas a moderadas ($r^2 \leq 0.5$) entre la altura de las geoformas observadas, el L/W y el $ICIR$ con las velocidades del flujo de hielo modeladas del Manto de Hielo Patagónico durante el Último Máximo Glacial. Esto podría indicar la existencia de mecanismos genéticos independientes de la propia dinámica glacial. En general, este estudio aporta nuevos conocimientos sobre las geoformas subglaciales en la Patagonia sur, así como su relación con los procesos glaciales del pasado y su impacto en el paisaje actual de la región.

Palabras Clave: Drumlin, Geomorfología subglacial, Manto de Hielo Patagónico, Morfometría, Último Máximo Glacial.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por; FONDECYT (ANID Postdoctoral #3220537) y el Centro Basal “Centro Cabo de Hornos” (ANID Basal CHIC #FB210018).

Gravas colgadas del cerro Coronta, San Lorenzo, Región de Coquimbo, Chile. Evidencia de la evolución del río Cogotí y Combarbalá

Andrés Alberto Quezada Jara¹, Rodolfo Ferrando Urmeneta¹, Felipe Coloma Bozzo¹, Javier Álvarez Amado¹

(1) Sernageomin, Geología General, Unidad de Geología Regional, Santa María 104, Santiago, Chile

En el sector nororiental del área que comprenden las cartas geológicas en confección Puerto Oscuro y Combarbalá (31°00'-31°30'S y 71°00'-71°45'O), se encuentra el cerro Coronta, ubicado entre los cauces de los ríos de escasa a esporádica escorrentía, Combarbalá y Cogotí, al oeste de la localidad de San Lorenzo, a 16,5 km al NNO de Combarbalá, en la región de Coquimbo. En su cuchilla de orientación NNW-SSE, cuya altura varía entre ca. 820 y 830 m s.n.m. es posible identificar depósitos de gravas colgadas, cuyas características permiten deducir parte de la evolución en el Neógeno de los ríos Cogotí y Combarbalá.

Las gravas cubren la parte superior del cerro Coronta, con una superficie de altura variable, pero plana en las cotas mayores (ca. 830 m s.n.m.) y una base de altura irregular. Su espesor máximo es de ca. 30 m; y su color gris claro-amarillo pálido y morfología suavizada marca un fuerte contraste con las rocas volcánicas purpura-rojizas y más rugosas de la Fm. Quebrada Marquesa (Cretácico Inferior) subyacentes. Además, la base de estas gravas se encuentra a más de 180 m sobre los puntos más bajos alrededor del cerro, los que corresponden a los lechos de los ríos Cogotí (ca. 650 m s.n.m.) y Combarbalá (ca. 635 m s.n.m.). Las gravas están formadas por clastos redondeados a bien redondeados discoidales polimícticos de color gris claro, gris oscuro, gris verdoso y gris-púrpura-rojizo, de tamaño entre 1 y 70 cm, entre los que predominan los tamaños entre 5 y 30 cm, que corresponden a rocas volcánicas porfíricas y brechas volcánicas (ca. 80%); intrusivos (ca. 20%); y escasas riolitas bandeadas. Los bloques tienen en general restos de costras de carbonatos de espesor milimétrico adosados en su superficie y además fragmentos centimétricos angulosos de carbonatos que se distribuyen entre ellos. Se observan fábricas matriz y clasto soportadas, pero de lo observado en la superficie se desprende que el estado del afloramiento podría ocultar una predominancia de éstas últimas. En los primeros 4 metros desde la superficie, existe una matriz/cemento de carbonatos, algo meteorizada hasta una profundidad de 3 metros, bajo la cual se observa un cemento sólido de carbonatos de color beige-blanco a gris de ca. 1 m de espesor. Bajo los 4 metros desde la superficie, la matriz consiste en arena de grano medio a grueso. No se aprecian patrones granodecrecientes o granocrecientes ni ha sido posible observar imbricación que permita establecer dirección de flujo a partir de los depósitos inspeccionados. Muchos de los clastos están fracturados en fragmentos de menor tamaño y más angulosos producto de intemperismo mecánico.

Se han identificado depósitos con características similares en algunos de los cerros ubicados al norte y al oeste de Coronta, hacia el límite nororiente de la carta. De éstos, los ubicados directamente al norte del área de estudio, en el sector sur de las cartas geológicas Ovalle y Peñablanca (Coloma *et al.*, 2020; 30°30'-31°00'S y 71°00'-71°45'O), han sido asignados a la unidad Formación Confluencia (Mioceno Superior-Plioceno Inferior).

De acuerdo con las características del afloramiento aquí descrito (cerro Coronta), se deduce que el depósito es de tipo fluvial correspondiendo a un río de lecho de grava al que se le puede asociar a la "litofacies Gh" o gravas estratificadas horizontalmente clasto soportadas (Miall, 2006). Además, se puede extrapolar el mismo ambiente y sus asociados hacia el norte, a los depósitos similares que se ubican en las cimas de los cerros alrededor del eje del río Cogotí. Dado que esos depósitos presentan, en general, alturas cada vez menores hacia el norte se desprende que el paleo río habría fluído de sur a norte, tal como ocurre con los drenajes circundantes actuales (*i.e.*, ríos Cogotí y Combarbalá).

De este modo, la configuración de las gravas del cerro Coronta y sus depósitos equivalentes, permite inferir algunas de etapas de la evolución de los ríos Cogotí y Combarbalá y constreñir su desarrollo en el espacio. Estas se resumen en: (1) Existencia de una llanura fluvial con relleno de gravas, que llegó a tener sectores con al menos 30 m de espesor y ca. de 4,5 km de ancho y más de 9 km de largo; (2) Abandono y erosión de la planicie por incisión, formación de charcos y posterior evaporación con precipitación de sales de carbonato; (3) Condiciones de intemperie generaron erosión y disolución de los carbonatos que circularon hacia abajo entre los clastos y la matriz de las gravas. Luego, estos precipitaron otra vez y pasaron a formar el cemento de las gravas más próximas a la superficie. (4) Formación de suelo en superficie de carbonatos, meteorización de los clastos de las gravas y del cemento de calcio más próximos a la superficie.

Palabras Clave: Río Combarbalá, Río Cogotí, Gravas Fluviales, San Lorenzo, Combarbalá.

Financiamiento: Esta contribución es parte y resultado del trabajo en el programa regular de mapeo geológico de la Subdirección de Geología de SERNAGEOMIN y fue financiado en el marco del Plan Nacional de Geología (PNG).

Agradecimientos: Se agradece la colaboración del equipo de conductores y asistentes logísticos de Sernageomin por facilitar y hacer más agradables y provechosas las tareas de terreno.

Referencias:

- Coloma, F.; Álvarez, J.; Creixell, C.; Emparán, C.; Salazar, E.; Calderón, M. 2020. Geología de las áreas Ovalle y Peña Blanca, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 208-209: 115 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Miall, A. D. 2006. The geology of fluvial deposits. Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology, 4th corrected printing. Springer-Verlag. 582 p.

Estratigrafía y procedencia de los sedimentos de paleodunas en las cuencas de Aconcagua y Rapel durante el Pleistoceno Tardío: Hacia un modelo de formación de paleodunas en la costa central de Chile

Estefania Quilamán Quintulén¹⁻², Juan Luis García¹⁻², Paula Castillo González³, Christopher Lüthgens⁷, Tania Villaseñor⁴,
Mónica Opazo⁶, Misael Cabello¹, Marco Pfeiffer⁵

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro UC Desierto de Atacama, Santiago, Chile

(3) Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie, Muenster, Germany

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería y Suelos, Santa Rosa 11315, Santiago, Chile

(6) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Avenida Alemania N° 021, Casilla 15-D, Temuco, Chile

(7) University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Institute of Applied Geology, Vienna, Austria

La costa de Chile central (32°-35°S) alberga un registro estratigráfico eólico que consiste en secuencias de paleodunas separadas por paleosuelos interestratificados. Se han reconocido específicamente tres generaciones de acumulación de arenas eólicas Pleistocénicas, Holocénicas y actuales. De las cuales, en la actualidad no existe conocimiento de la fuente de las arenas que conforman estas unidades. No sabemos si estas fuentes cambian en el tiempo o si prevalecen, por ejemplo, a lo largo de un ciclo glacial-interglacial. Del trabajo de García et al., (2019) y Veit et al., (2015) se concluye que las arenas dunarias se depositan también durante periodos glaciales, pero no hay alusión a la procedencia (fuente) de las arenas. Otros autores, realizan una aproximación sobre las fuentes de los sedimentos dunarios, sin precisar aún el origen y los procesos asociados que dan lugar a los granos de arenas. Entonces, entender la procedencia de las arenas dunarias es relevante porque nos entregaría información basal sobre las unidades morfoestructurales del relieve continental de donde se originan las arenas y los procesos erosivos asociados.

La distribución espacial de los depósitos de dunas en la costa (al norte de la desembocadura de importantes ríos andinos y pre-andinos) sugiere que las arenas tienen su origen en procesos morfogenéticos y erosivos glaciales y/o fluviales que ocurrieron en el pasado en las cuencas hidrográficas. Sin embargo, estas posibilidades no han sido estudiadas en profundidad, y surge la interrogante que guía esta investigación: ¿De dónde provienen las arenas que conforman los depósitos paleodunarios? y si efectivamente, ¿la fuente cambia durante y a través del tiempo?

Presentamos nuestro enfoque metodológico y los resultados de nuestra investigación en las cuencas hidrográficas de los ríos Aconcagua y Rapel, donde se encuentran sitios de estudio que incluyen paleodunas, dunas, terrazas fluviales y morrenas. En estos sitios, recolectamos información estratigráfica detallada y llevamos a cabo diversas técnicas de datación y metodologías de procedencia sedimentaria (fuente de arenas). Para determinar la edad de los sedimentos, utilizamos la técnica de datación U-Pb mediante LA-ICPMS, donde analizamos 100 granos de circones detríticos por muestra. Esta técnica nos permite obtener cronologías precisas y confiables. Además, utilizamos dataciones de Luminiscencia Ópticamente Estimada (OSL, siglas en inglés) en feldspatos ricos en potasio (Feld-k) presentes en las arenas de las unidades estudiadas. Realizamos análisis y descripción petrográfica de láminas transparentes de cada unidad, y análisis de minerales pesados, con el fin de caracterizar y restringir la fuente de los sedimentos. Estos métodos nos brindan información valiosa sobre la fuente y condiciones de formación de las paleodunas en el pasado. Es importante destacar que este enfoque metodológico ha sido previamente utilizado con éxito por los autores en estudios similares (por ejemplo, García et al., 2019), demostrando su eficacia para obtener cronologías confiables en el registro sedimentario eólico de Chile Central. Con estos análisis y técnicas de datación, esperamos obtener una comprensión más completa acerca la variación de la procedencia de arenas durante el Pleistoceno para las cuencas de Aconcagua y Rapel, así como del papel de los procesos eólicos y fluviales en la formación de los depósitos sedimentarios.

Al comparar las edades de circones detríticos obtenidas mediante la técnica de datación U-Pb con unidades geológicas que conforman las cuencas de Aconcagua y Rapel, hemos identificado diferentes fuentes de rocas, como las provenientes de los Andes y las costas. Estos hallazgos respaldan la idea de una procedencia amplia (extensa) pero limitada a cuencas locales, para las arenas que conforman las paleodunas en la región. Los resultados indican que las principales fuentes de arena han cambiado su importancia relativa a lo largo de la última edad de hielo. Por ejemplo, podemos interpretar que durante MIS 2, se observa una mayor afinidad con las fuentes andinas, mientras que en el período MIS 4, se identifica una mayor afinidad con las fuentes costeras. Estos patrones sugieren cambios en los procesos de transporte y deposición de sedimentos durante los eventos glaciales. A continuación, discutimos las implicaciones de nuestros datos con relación a la procedencia de las arenas y registro estratigráfico en las paleodunas de Chile central.

Palabras Clave: procedencia, cuaternario, paleodunas, Pleistoceno.

Financiamiento: FONDECYT 1200935.

Referencias:

- Araya-Vergara J.F. Reconocimiento de tipos e individuos geomorfológicos regionales 718 en la costa de Chile. Revista Informaciones Geográficas, 1976, N°23, p. 9-30. 719 Sección Geomorfología, 38.
- Brüggen, J. 1950. Fundamentos de la geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, 374 p. Santiago.
- Fuenzalida H. 1956. Campos de dunas en la costa de Chile central. Congrès International de Géographie, Actes XVIII; 234-240. Rio de Janeiro.
- García, J. L., Andrade, B., Calderón, M., y Lüthgens, C. (2019). Multi-millennial scale climate variability during MIS 3 and MIS 2 inferred from luminescence dating of coastal sand dunes and buried paleosol sequences in central Chile, 32° S. Journal of Quaternary Science, 34(3), 203-214.
- Veit, H., Preusser, F., y Trauerstein, M. (2015). The Southern Westerlies in Central Chile during the two last glacial cycles as documented by coastal aeolian sand deposits and intercalating paleosols. Catena, 134, 30-40.

Estratigrafía y facies sedimentarias de los depósitos del Cenozoico tardío de la ladera norte del río San Salvador; flanco occidental de la Cordillera de Domeyko, Región de Antofagasta, Chile

María Consuelo Rebolledo Gaínza¹, Rodrigo Riquelme¹, Jorge Morales¹, Sebastián Muñoz¹, Eduardo Campos¹, Bastián Herrera¹, Sebastián Espinoza¹, Renato Cisternas¹, Christopher López¹

(1) Facultad de Ing. y Cs. Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta

La discusión sobre la evolución tectónica y paleoclimática del antearco andino del Desierto de Atacama (~16°-26° Lat. S) proviene, en gran medida, del estudio del registro sedimentario del Cenozoico tardío (e.g., Victor *et al.*, 2004; Jordan *et al.*, 2014). Un cambio en la distribución de este registro y en las características morfoestructurales del antearco ocurre a la latitud de la hoya hidrográfica del río Loa (~22°30' Lat. S) (Blanco, 2008). Hacia el norte, estos depósitos alcanzan hasta 1000 m de potencia, y se exponen continuamente por más de 1000 km a lo largo de la Depresión Central del sur del Perú y norte de Chile. En este segmento, los depósitos tienen un carácter predominantemente syntectónico, lo que ha permitido discutir la magnitud y temporalidad de la actividad de fallas y pliegues monoclinales que controlan la evolución de la Depresión Central como una cuenca tectónica de antearco (e.g., García and Herail, 2005). En la hoya del río Loa, los depósitos del Cenozoico tardío se exponen continuamente entre el arco volcánico actual y la Depresión Central. En esta región, estos depósitos han permitido discutir, fundamentalmente, sobre la evolución paleoclimática del antearco. En particular, la desecación climática del Mioceno Medio, se registra el cambio, estratigráficamente hacia arriba, de los paleosuelos interestratificados, desde vertisoles cálcicos a *gypsisoles* sálicos (Rech *et al.*, 2019). Aún más, un conspicuo horizonte de *gypsisol*, expuesto sobre gran parte de la superficie de la Depresión Central, desde esta latitud hasta los ~26°S Lat. S, refleja la inhibición de la erosión y de la producción significativa de sedimentos en la Depresión Central del Desierto de Atacama (Muñoz-Farías *et al.*, 2023). La tendencia de desecación es interrumpida por episodios climáticos húmedos de corto plazo; previo al inicio de la hiperaridez. Estos se evidencian por intercalaciones de facies carbonatadas lacustres-palustres (e.g., Hartley & May, 1998); seguidos, por periodos de erosión de <1 Ma de duración (e.g., Jordan *et al.*, 2014). En este trabajo, se presenta la estratigrafía y las facies sedimentarias de los depósitos del Cenozoico tardío expuestos en el borde oriental de la Depresión Central, dentro de la hoya del río Loa; específicamente, al norte del cañón del río San Salvador (22°23' 50''-22°26' 25'' Lat. S; 69°14' 46,3'' - 69°11' 53'' Long. W) . Esta secuencia se compone de cinco unidades litoestratigráficas. De base a techo, estas corresponden a: (1) depósitos evaporíticos constituidos por anhidritas pulverulentas con intercalaciones de lutitas; (2) unidad compuesta por tres series estratigráficas: la primera presenta una alternancia de estratos decimétricos de areniscas y lutitas, la segunda corresponde a una alternancia de areniscas, lutitas y conglomerados, y la tercera se compone por lutitas, areniscas y conglomerados, con predominancia de materiales finos en su parte basal, y una serie amalgamada (*i.e.*, sobreimposición de canales) con niveles finos subordinados, hacia el techo. Sobreyaciendo y (3) depósitos aluviales y coluviales antiguos, compuestos por sedimento semiconsolidado con clastos de tamaño grava, arena y arcilla, con lentes de tobas. En discordancia de erosión sobre la unidad (3), se reconocen (4) depósitos semiconsolidados, con clastos polimícticos de tamaño arena a grava. Finalmente, (5) depósito de aluviones jóvenes, en los que se reconoce la actual superficie de erosión.

Palabras Clave: estratigrafía, paleoclima, evolución geomorfológica, Desierto de Atacama, análisis de facies.

4 Ma uplift cycles of the southern peruvian forearc since the late Miocene

Vincent Regard¹, Joseph Martinod², Marianne Saillard³, Sébastien Carretier¹, Laetitia Leanni⁴, Gerard Hérail¹, Laurence Audin⁵, Kevin Pedoja⁶

(1) University of Toulouse, Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse, 31400, France
 (2) ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, Le Bourget du Lac, 73376, France
 (3) Geoazur, Université Côte d'Azur, Sophia Antipolis, 06560, France
 (4) CEREGE, Aix Marseille University, Aix-en-Provence 13545, France
 (5) ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, Grenoble, 38058, France
 (6) M2C, Normandie Université, Caen, 14000, France

Note. This work is published in Regard et al. (2021). The following text is modified from this publication.

Introduction

The work presented here focuses on the acquisition of relief in the Andean forearc during the Neogene (Garzione et al., 2008). To this end, we have explored coastal morphology along a 500 km long uplifted coastal segment in the central Andes, between the cities of Chala (Peru) and Arica (Chile). This area of southern Peru exhibits numerous marine terrace sequences (Hsu et al., 1989; Goy et al., 1992; Ortlieb et al., 1996, 1996; Saillard et al., 2011). This testifies for a recent uplift which may have begun during the Pleistocene, after a period of relative stability (Regard et al., 2010). In this work, we use geochronological constraints for example for pediment emplacement dating (Evenstar et al., 2017) together with new geomorphological observations. These new observations indicate a specific behavior of the forearc, suggesting that it underwent ~4 Ma-long cycles of alternating rapid uplift vs. slower uplift or subsidence.

Marine terraces and pediments

Herein, we take advantage of high accuracy DEM (TanDEM-X, resolution: 12 m, provided by DLR- German Aerospace Center) to map uplifted shorelines, usually made of a fossil sea-cliff at its continental side and, at its sea side, a platform terrace either carved into the underlying rock formations or built with sediments (cf. Figure 1). We used this dataset to manually map the main cliffs and scarps along a ~600-km-long coastal stretch alongshore southern Peru from 75°W (15.5°S, close to San Juan de Marcona) to the city of Arica close to the Chile-Peru border (70.3°W, 18.5°S). The location of the fossil sea-cliffs is determined based on geomorphological features observed on satellite imagery and DEM slopes (threshold at 10 degrees). Care is needed because former cliffs have been uplifted and partly eroded, marking a smoothed topographic step between marine terraces. Fossil sea cliffs are organized relatively parallel to the coast along high-slope strips (e.g., Regard et al., 2017). The location and elevation of the fossil cliff is recorded by their shoreline angle (or cliff toe), which is used to calculate the uplift rate (e.g., Perg et al., 2001; Pedoja et al., 2006, 2011; Saillard et al., 2009; Regard et al., 2017). The cliff toe is usually impeded by sediments deposited at the cliff foot, which adds uncertainty to the location of the fossil cliff (e.g., Pillans, 1983). The remote sensing visualization allows a manual drawing of the cliff toe, cross-validated by field observations, whether geomorphological (cliff, stacks) or geological (shells, beach rocks or beach pebbles). In the following, we differentiate some "main cliffs", corresponding to high fossil cliffs. They differ from simple cliffs, likely corresponding to a single glacial cycle (as observed in southern Peru, Saillard et al., 2011; and northern Chile, Martinod et al., 2016), and are consequently limited in height (< 100 m). This remote sensing analysis (DEM + satellite images) revealed pediments. Pediments (or "degradational surfaces" sensu Evenstar et al., 2017) are gently dipping continental surfaces associated with a well-developed drainage network, easily mapped by remote sensing (Evenstar et al., 2017). We only report them where they neighbor the coastal escarpment. We assume they formed close to where the sea level stood when they formed. We record their lowest elevation which indicates a maximum uplift for marine features.

In terms of dating, we compiled both existing data and 9 original ¹⁰Be cosmogenic nuclide exposure ages to decipher the uplifted shore chronology up to 0.8 Ma ago. Previous authors concentrated their efforts on areas where sediments are found, thereby allowing for electronic spin resonance (ESR), amino acid racemization or U-Th dating to be carried out (Hsu et al., 1989; Ortlieb et al., 1992, 1996). More recently, terrestrial cosmogenic nuclides have proven their usefulness in dating marine abrasion landforms (Saillard, 2008; Saillard et al., 2011 in Peru; Quezada et al., 2007; Melnick et al., 2009; Saillard et al., 2009; Rodriguez et al., 2013; Jara-Muñoz and Melnick, 2015; Binnie et al., 2016; Martinod et al., 2016 in Chile). These works emphasize that it is hard to date precisely landforms older than 0.5 Ma. Other Neogene chronological milestones are given by: (i) the remnants of fan deltas (Pena et al., 2004; Alván and von Eynatten, 2014), (ii) the geomorphological evolution in relation to supergene mineralization (Quang et al., 2005), and (iii) the canyon incision history (Kober et al., 2006; Schildgen et al., 2007, 2009; Thouret et al., 2007; Wipf et al., 2008). These milestones are indirect and are therefore not accurate indicators for uplift; consequently, the Plio-Pleistocene uplift history of the forearc is still uncertain, which limits our ability to link potential uplift variations with tectonic controls.

Marine terraces usually formed during sea level highstands (e.g., Zeuner, 1952; Chappell, 1974; Lajoie, 1986; Saillard et al., 2009; Pedoja et al., 2011; Regard et al., 2017; de Gelder et al., 2020), i.e., odd MIS (marine isotopic stage). We assume in the following that the fossil shores we sampled only formed during interglacial highstands (Melnick, 2016; Martinod et al., 2016; Saillard et al., 2017). We worked on sequences of marine terraces, in which we correlated marine terraces with high sea levels (interglacial stages and substages) up to MIS 19 (790 ka), i.e., with a resolution of ~100 ka. In order to calculate the uplift rates (U), we use the equation $U = (z - sl)/t$, where z is the raised shore elevation, sl is the sea level at the time t when it formed. As the raised shores are tied to the MIS ages, t is actually the MIS age.

Pediment ages are provided by Evenstar et al, who conclude that the area underwent major surfacing at approximately 23, 16, 11, 7 and 3 Ma ago. These are abandonment ages; we assume the pediment formation is a long standing process that can last for 1-2 Ma.

Site analysis

A detailed analysis of the geometry of the terraces, cliffs and pediments was carried out along the 600 km of coastline studied. Statistical analysis was then carried out for each 50 km bins, in particular for the elevations of cliff feet (i.e. marine terraces/ancient shorelines). In order to establish the sequence chronology, we first worked out clean sequences where the ages provide absolute temporal constraints and fix the sequence. We first propagate these sequences to other sequences where the morphological dating was quite obvious (one terrace for each interglacial). Finally, we filled the gaps thanks to the density plots in the 50 km bins. Finally, we obtain a graph summarising this data (Figure 2), that shows that the uplift slightly increases (~50%) from Arica (0.20 mm/a) to Pescadores (0.30 mm/a), 400 km to the northwest. Between Pescadores and Chala, it quickly increases in 125 km (~60%, i.e., MIS 19 lies at 245 m asl in Pescadores and at 344 m asl in Chala bay). The uplift rate is 0.49 mm/a on average at Chala (sites Chala and 525±25 km).

These Pleistocene terraces are backed by an ancient sea cliff (Regard et al., 2010). This cliff is often topped by a pediment (cf. Figure 1). Meanwhile, canyons cutting this pediment are sometimes filled by 2-3 Ma old lavas. Taking into consideration the compilation of pediment ages by Evenstar et al. (2017), the pediment age is likely to be ~3 Ma. This pediment is backed by a scarp more or less parallel to the coastline, which is likely to represent an ancient sea cliff. This latter is again topped by a pediment backed with a sea cliff (see Figure 3 for a summary of observations).

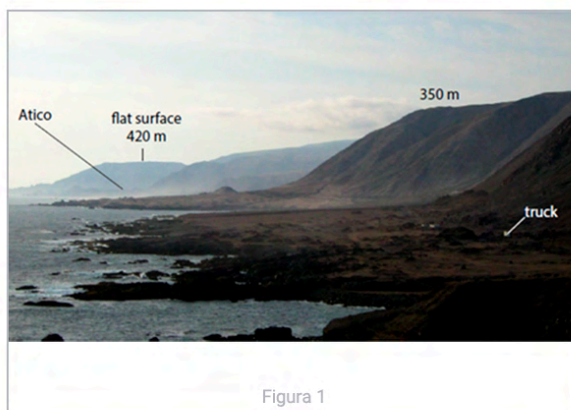


Figura 1

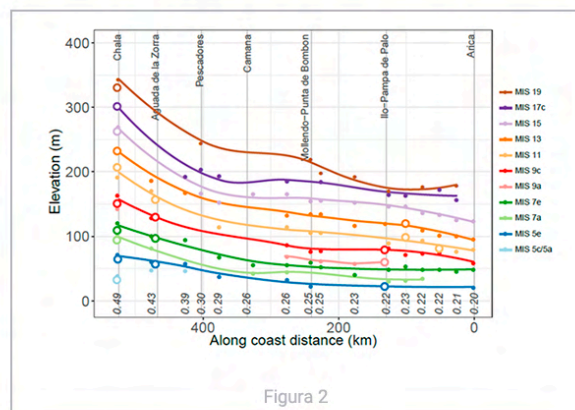


Figura 2

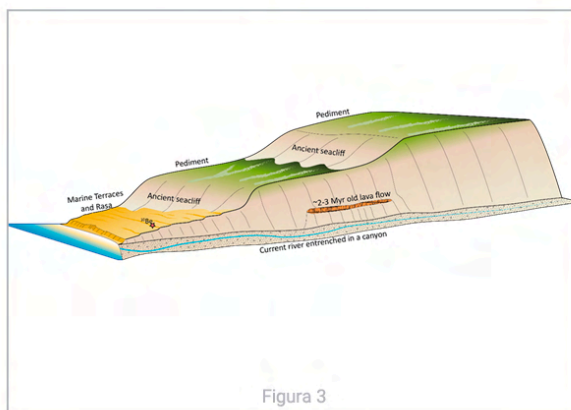


Figura 3

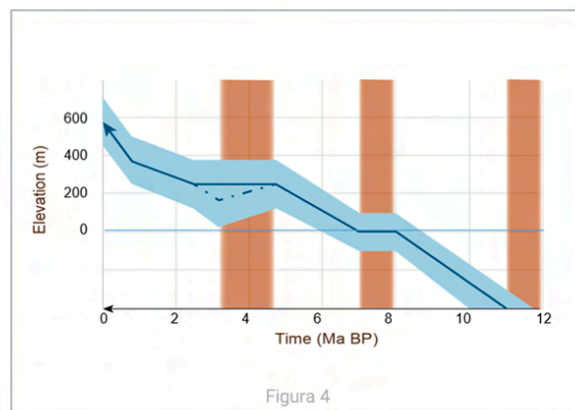


Figura 4

Figure 1. Interpretated photo looking towards the northwest of the coastal sequence 10 km south of Atico, at km 432.5 (73.62°W, 16.25°S). The white square to the right is a truck and its trailer. The background corresponds to the approximate location of the city of Atico. The rasa is backed by a major cliff whose top in the foreground lies at ~350 m asl, at a similar elevation as a pediment detected uphill from the truck. In the background, to the left, the flat summit surface lies at ~420 m asl; it has the characteristics of a pediment.

Figure 2. Shoreline angle elevation vs. distance to Arica in function of the age (expressed in MIS, points). The open circles indicate the data based on absolute ages (literature plus new cosmogenic nuclide data). The bottom numbers indicate the average uplift rates in mm/a. The uncertainty of shoreline angle elevations is estimated to +/- 5 m.

Figure 3. Schematic summary of observations. From the bottom to the top we usually observe. (i) A coastal plain where marine terrace can be found, otherwise it is considered as a rasa; some terraces have been dated, including new ^{10}Be ages. (ii, iii, iv) a sea cliff topped by a pediment: this pattern is observed three times in a row. These morphological features are often cut by canyons; some of the canyons have been temporarily filled by Pliocene to Pleistocene deposits (lavas).

Figure 4. Inferred uplift history of the south Peru forearc, taking the 7 Ma-old pediment surface as reference. The brown areas correspond to periods of pediment development. The blue curve represents the uplift (the dashed and dotted line represents the possibility of subsidence rather than stability between uplift periods). This graph shows ~4 Ma-long cycles of alternating periods of uplift (average velocity of ~0.1 mm/a, but possibly faster during short periods) and periods of stability (if not subsidence). Note that our time resolution cannot be used to determine the uplift velocity evolution on the Ma scale, except for the ultimate cycle documented in this study.

Conclusions

We interpret pediments backed by sea cliffs to be correlative to a period of stability (necessary for pediment development) after a period of uplift. The cliff then corresponds to a period during which the sea has eroded the coastline after uplift cessation. The most recent stage is best preserved so that the current coastal plain exhibits whether marine terrace sequences or *rasas*, the pediment is due to form in the future with the degradation/weathering of these features.

Doing so, we detected three periods of coastal stability or subsidence in the last 12 Ma. These periods are marked by pediment development. using the compilation by Evenstar et al. (2017), we infer that these periods occurred at ~12-11 Ma, ~8-7 Ma, and ~5-2.5 Ma. Uplift that accumulated between these periods of stability has been ~1,000 m since 11 Ma; its rate is up to 0.25 mm/a (m/ka). For the last period of uplift only, during the last 800 ka, the forearc uplift has been accurately recorded by the cutting of numerous coastal sequences. The uplift rate for this latter uplift period increases westward from 0.18 mm/a at the Peru-Chile border to ~0.25 mm/a in the center of the study area. It further increases northwestward to 0.45 mm/a due to the influence of the Nazca Ridge.

Thus, we document unusual cyclic forearc uplift with cycles of ~4 Ma in duration. This periodicity is consistent with predictions made by Menant et al. (2020) based on numerical models, and may be related to episodic tectonic uplift (subduction slab detachment) beneath the coastal forearc zone.

Keywords: Marine terraces, south Peru, uplift cycles, subduction, pediment.

References:

- Alván, A., and von Eynatten, H., 2014, Sedimentary facies and stratigraphic architecture in coarse-grained deltas: Anatomy of the Cenozoic Camaná Formation, southern Peru (16°25'S to 17°15'S): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 54, p. 82–108, [doi:10.1016/j.jsames.2014.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.04.008).
- Binnie, A., Dunai, T.J., Binnie, S.A., Victor, P., González, G., and Bolten, A., 2016, Accelerated late quaternary uplift revealed by ¹⁰Be exposure dating of marine terraces, Mejillones Peninsula, northern Chile: *Quaternary Geochronology*, v. 36, p. 12–27, [doi:10.1016/j.quageo.2016.06.005](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.06.005).
- Chappell, J., 1974, The Geomorphology and Evolution of Small Valleys in Dated Coral Reef Terraces, New Guinea: *The Journal of Geology*, v. 82, p. 795–812, [doi:10.1086/628030](https://doi.org/10.1086/628030).
- Evenstar, L.A., Mather, A.E., Hartley, A.J., Stuart, F.M., Sparks, R.S.J., and Cooper, F.J., 2017, Geomorphology on geologic timescales: Evolution of the late Cenozoic Pacific paleosurface in Northern Chile and Southern Peru: *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 1–27, [doi:10.1016/j.earscirev.2017.04.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.004).
- Garzione, C.N., Hoke, G.D., Libarkin, J.C., Withers, S., MacFadden, B., Eiler, J., Ghosh, P., and Mulch, A., 2008, Rise of the Andes: *Science*, v. 320, p. 1304–1307, [doi:10.1126/science.1148615](https://doi.org/10.1126/science.1148615).
- de Gelder, G., Jara-Muñoz, J., Melnick, D., Fernández-Blanco, D., Rouby, H., Pedoja, K., Husson, L., Armijo, R., and Lacassin, R., 2020, How do sea-level curves influence modeled marine terrace sequences? *Quaternary Science Reviews*, v. 229, p. 106132, [doi:10.1016/j.quascirev.2019.106132](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106132).
- Goy, J., Machare, J., Ortlieb, L., and Zazo, C., 1992, Quaternary shorelines in southern Peru: A record of global sea-level fluctuations and tectonic uplift in Chala Bay: *Quaternary International*, v. 15–16, p. 99.
- Hsu, J.T., Leonard, E.M., and Wehmiller, J.F., 1989, Aminostratigraphy of Peruvian and Chilean Quaternary marine terraces: *Quaternary Science Reviews*, v. 8, p. 255–262.

Estudio de la cubierta de sedimentos y la morfología del Glaciar cubierto Pirámide, Chile Central (33°S)

Gabriela Reyes Kutscher¹, Gabriel Easton Vargas¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El glaciar Pirámide es un glaciar cubierto de detritos ubicado en la cuenca hídrica del Río Yeso. Este corresponde a la masa de hielo con un mayor volumen de agua equivalente de la cuenca y su escorrentía, producto del derretimiento glacial, alimenta directamente el embalse del Yeso, fuente principal de agua potable de la ciudad de Santiago (DGA, 2012). A pesar de que múltiples autores (Ferrando, 2012; Torres et al., 2013; Quezada, 2018; Janke et al., 2015) han estudiado diversos aspectos físicos del glaciar Pirámide, tal como su balance de masas y retroceso en los últimos años, aún no se ha profundizado en el estudio de los factores que inciden en la cubierta de detritos que lo diferencia respecto de los glaciares vecinos.

Con el objetivo de determinar los factores geológicos y geomorfológicos que han condicionado la posición del frente del glaciar Pirámide y las características de su cubierta de detritos, se estudió en profundidad el valle de glaciar desde su geomorfología, litología, sedimentología y geología estructural usando herramientas como la teledetección, observaciones de terreno, junto con análisis petrográfico, sedimentológico, mineralógico y geoquímico de muestras de sedimento y rocas de sus depósitos. En la zona de estudio, a escala regional, se han definido múltiples estructuras propias de la Faja Plegado y Corrida del Aconcagua; la falla Yeso, la falla Piuquenes y el anticlinal Pirámide (Giambiagi et al., 2015; Riesner et al., 2018; Mardones et al., 2021). En este trabajo se analiza el rol de estructuras como condicionantes de zona de daño en el macizo rocoso que, junto con las altas pendientes del valle, favorecen el aporte detrítico a la cubierta glacial.

Se realizó un análisis y cartografía escala 1:15.000 de la geomorfología, geología y estructura del valle, es decir de la litología y las geoformas que componen la cuenca del glaciar Pirámide, junto con el estudio de la litología, mineralogía y sedimentología de la cubierta de detritos, a partir del análisis de sus depósitos incluyendo, un mapa escala 1:2.000 de la morrena frontal del glaciar realizado a través de un modelo de elevación digital y un ortomosaico de imágenes tomadas a partir de un vuelo de dron.

Se propone que la falla presente en el valle corresponde a una estructura de rumbo paralelo al mismo, con un anticlinal asimétrico de vergencia oeste caracterizado por un flanco oriental apretado y un flanco occidental más flojo cortados por la falla, poniendo en contacto rocas de la Formación Lo Valdés con rocas de la Fm. Río Damas. Esta estructura correspondería a una previamente descrita en el valle a escala regional por Riesner et al. (2018), mostrando diferencias con lo previamente señalado por Mardones et al. (2021), en cuanto a su posición al norte del valle. La zona de daño de esta falla debilita las rocas favoreciendo la producción de detritos que caen regularmente desde la cabecera del valle sobre el glaciar, caracterizada además por fuertes pendientes, del orden de 60°. Además, se reconocen las distintas etapas de evolución reciente del glaciar Pirámide que se distinguen a partir de la caracterización de las unidades geomorfológicas de sus depósitos.

Se concluye que los detritos que cubren el glaciar provienen principalmente desde la cabecera del valle del Pirámide que está rodeado por paredes de roca debilitada por la estructura geológica de rumbo norte sur y meteorización física. La litología dominante es rocas calcáreas y lavas de la Formación Lo Valdés con aportes laterales de areniscas con óxido de hierro, yeso e intrusivos. El espesor de la cubierta de detritos, junto con el contenido de calcita en los sedimentos tamaño arcilla detectados en los análisis como producto de la descomposición de estas rocas favorecería la preservación del glaciar a través de sus propiedades térmicas que lo aíslan de la atmósfera.

Palabras Clave: Geomorfología glacial, Cubierta de detritos, Falla inversa.

Financiamiento: Este trabajo es patrocinado por el Laboratorio de Sedimentología y Medio Ambiente de la Universidad de Chile.

Referencias:

- DGA (2012) Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central, 81p.
- Ferrando, F. (2012). Glaciar Pirámide: Características y evolución reciente de un glaciar cubierto. Evidencias del cambio climático. Investigaciones Geográficas, 44, 57–74.
- Janke, J. R., Bellisario, A. C., & Ferrando, F. A. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. En Geomorphology (Vol. 241, pp. 98–121). Elsevier.
- Mardones, V., Peña, M., Pairoa, S., Ammirati, J. B., & Leisen, M. (2021). Architecture, Kinematics, and Tectonic Evolution of the Principal Cordillera of the Andes in Central Chile (33.5°S): Insights From Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Seismotectonics Implications. Tectonics, 40(7).
- Quezada, S. (2018). Estimación del aporte glaciar a la escorrentía del Río Yeso Mediante el análisis de trazadores naturales de agua. Universidad de Chile.
- Riesner, M., Lacassin, R., Simoes, M., Carrizo, D., & Armijo, R. (2018). Revisiting the crustal structure and kinematics of the Central Andes at 33.5 S: Implications for the mechanics of Andean mountain building. Tectonics, 37(5), 1347–1375.
- Torres, H., Brenning, A., & García, J.-L. (2017). Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos. Espacios, 3(5), 11.

The Antarctic Cold Reversal in Central Chile?

Fabian Riquelme¹, Esteban A. Sagredo¹⁻², Michael Kaplan³, Hevia Rodrigo¹, Rodrigo L. Soteres⁴⁻⁵, Joerg Schaefer³

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Estación de Investigaciones Multidisciplinarias Patagonia UC, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Columbia University, Lamont-Doherty Earth Observatory, 61 Rte 9W, Palisades, Estados Unidos

(4) Universidad de Magallanes, Centro de Investigación GAIA-Antártica, Avenida Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile

(5) Universidad de Magallanes, Centro Internacional Cabo de Hornos, O'Higgins 310, Puerto Williams, Chile

The period at the end of the last glaciation, known as Termination 1 (T1; ~18.0 ka to 11.7 ka), is characterized by an increase of global temperature, rapid melting of ice masses across the planet, reorganization of the coupled ocean-atmosphere system, sea level rise, and a vast increase in atmospheric greenhouse gases. Isotope records from Antarctic ice cores analysis shows that the net warming trend is interrupted by a millennial-scale temperature drop/stabilization during a period termed Antarctic Cold Reversal (ACR; 14.7 ka - 12.7 ka). Despite some paleoclimate proxies suggesting a hemispheric-wide ACR footprint, how this event affected mountain glaciers is still under debate. Temperate valley glaciers are sensitive systems to temperature and moisture variations and, thus, moraines formed during expansive/stabilization episodes represent a good proxy to elucidate past abrupt climate changes, including ACR. Extensive sedimentological and geomorphological glacial records along with ¹⁰Be chronologies have served to delimitate the timing of glacier variations during T1, showing multiple ACR ice advances/standstills between 44° and 54°S in Patagonia. The lack of studies to the north of these latitudes precludes assessing the influence of this climatic signal in the central Andes and associated latitudes of the southern hemisphere. To fill this gap, this work presents a 10Be exposure chronology developed on three nested moraines formed by Cipreses Glacier in Central Chile (34°S). Five ages in close stratigraphic order, together with a previously published age, suggest possible pre-ACR and ACR glacier advance/stabilization periods at ~15,400 ± 290 a (n=1), 14,899 ± 220 a (n=2), and ~13,320 ± 250 a (n=1), respectively. The oldest age is statistically consistent with a Heinrich Stadial 1 (HS1, ~17.8 ka to 14.7 ka) glacier advance identified in northern Patagonia (Rifón Glacier, 44°S); whereas the other two advances are consistent with ACR advances identified across the entire Patagonian region. Although the ages obtained in the Cipreses area constrained ACR glacier activity, more data is needed to improve the local glacier history during T1 and to properly compare with similar glacial chronologies at hemispheric and global scale, shedding light on the potential mechanisms underlying this millennial-scale temperature reversal.

Keywords: Antarctic Cold Reversal, Central Chile, Cipreses Glacier.

Patagonian Ice Sheet influence on Patagonian Climate during the Last Glacial Maximum: a sensitivity test

Fabian Riquelme¹, Nicolás Cosentino¹⁻², Jiang Zhu³, Fabrice Lambert¹, Esteban Sagredo¹⁻⁴

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Geografía, Historia y Ciencia Política, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Università degli Studi di Milano Statale, Via Festa del Perdono, 7, Milano, Italia

(3) University Corporation for Atmospheric Research, National Center for Atmospheric Research, 1850 Table Mesa Dr, Boulder, Estados Unidos

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Estación de Investigaciones Multidisciplinares Patagonia UC, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

The Last Glacial Maximum (LGM; 26.5-19.0 ka), was a period characterized by a dramatic sea level drop (~120 m), atmospheric carbon dioxide concentration ~50% lower than today, and a 6°C colder global mean surface temperature. Parallel to these conditions large ice masses developed over the continents. In Patagonia, the biggest landmass in midlatitudes of the Southern Hemisphere, the Patagonian Ice Sheet (PIS) grew, with a north-south orientation, over more than 2,000 km, between ~38°S and 54°S, covering the southern Andes Mountains and adjacent areas. Today, in this area, the interaction of the Southern Westerly Winds (SWW) with Patagonian topography generates a drastic rain shadow effect, expressed in a precipitation variation from ~4 m a⁻¹ on the western side of the Andes to c. 0.3 m a⁻¹ on the eastern side. An extensive sedimentological and geomorphological record, along with ¹⁰Be surface exposure ages, show that in Patagonia the maximum glacier extension to the east of the Andes was reached several millennia before LGM time. One hypothesis that explains this asynchrony is that the thickness of PIS over the Andes intensified the orographic rain-shadow in Patagonia. This would have diminished ice accumulation on the eastern side of the Andes. To assess this relationship, we carried out a sensitivity analysis of the impact of the PIS thickness on Patagonian climate using an Earth System Model under LGM boundary conditions. Preliminary results show that a thicker (thinner) PIS generates a decrease (increase) of precipitation and higher (lower) surface temperature on the eastern side of the Andes. In other words, the preliminary results suggest that PIS thickness modifies the variables that control glacier mass balance, offering an explanation to the asynchrony between the LGM period and the eastern PIS glacier lobes maximum extension. Furthermore, during this presentation, we will explore whether PIS topography influence the location and intensity of zonal winds, as well as its impacts on both frequency and intensity of storm tracks over Patagonia. This will improve our comprehension of the PIS topography as a climatic forcing during LGM.

Keywords: Last Glacial Maximum, Patagonian Ice Sheet, Earth System Model.

Superficies de planación y evolución geomorfológica del Desierto de Atacama a escala geológica

Rodrigo Riquelme¹, Sebastián Muñoz-Farías¹, Stephanie Brichau²

(1) Universidad Católica del Norte, Depto. de Ciencias Geológicas, Fac. Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
 (2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Geosciences Environnement Toulouse, Francia

La evolución geomorfológica neógena a la escala de las grandes unidades fisiográficas del Desierto de Atacama, del norte de Chile y sur del Perú, se ha establecido, en gran medida, gracias a remanentes colgados de peneplanicies (*peneplains*) que truncan las cumbres del paisaje, y a pediplanos (*pediplains*) dispuestos en los piedemontes a menores elevaciones (para una síntesis ver Evenstar et al., 2017 y Muñoz-Farías et al., 2023). En el Desierto de Atacama, las peneplanicies y los pediplanos han sido indistintamente tratados como superficies de planación del relieve (*planation surfaces*), no obstante que, son superficies con distinto significado genético y temporal (e.g. Dohrenwend & Parsons, 2009; Twidale et al., 1979). La formación de las superficies de planación se atribuye a periodos de quiescencia tectónica, mientras que, su incisión y abandono se asocia a episodios discretos de alzamiento andino (e.g. Quang et al., 2005; Bouzari and Clark, 2002; Bissig and Riquelme, 2010). Además, la estabilización y preservación de estas superficies se atribuye al establecimiento de las condiciones de extrema aridez en el Desierto de Atacama durante el Mioceno Medio (e.g. Dunai et al., 2005). Aún más, eventos de retrabajo aluvial que modifican levemente estas superficies luego de su estabilización, han sido interpretados como producto de episodios climáticos discretos de mayor pluviosidad, de carácter regional, que interrumpen la extrema aridez del Desierto (e.g. Dunai et al., 2005; Evenstar et al., 2017; Muñoz-Farías et al., 2023). En esta contribución presentamos una revisión de la bibliografía sobre superficies de planación que nos permite identificar rasgos geomorfológicos y relaciones estratigráficas útiles para diferenciar peneplanicies y pediplanos en el Desierto de Atacama. Luego, hacemos una revisión de datos geocronológicos de minerales supérgenos, de niveles volcánicos y de datos de termocronología de baja temperatura que permiten constreñir las edades de formación de peneplanicies y pediplanos. De la misma manera, hacemos una revisión de las edades de exposición de superficies, a partir de nucleidos cosmogénicos, que han sido utilizadas para inferir las edades de estabilización y de los subsecuentes eventos de retrabajo aluvial que modifican estas superficies. De nuestra revisión, observamos que las peneplanicies son más bien la norma que la excepción durante la evolución geológica neógena del Desierto de Atacama. Sin embargo, estas superficies no pueden ser correlacionadas sobre grandes distancias y su uso como marcadores de un único evento tectónico o climático debe ser tomado con cautela. De hecho, algunas de las peneplanicies reconocidas son superficies polifásicas, que tomaron varios millones de años en formarse (incluso >17 Ma), y que resultan de una compleja concatenación de forzantes tectónicos, climáticos y factores geomorfológicos intrínsecos (e.g. Evenstar et al., 2017 y Muñoz-Farías et al., 2023). Las peneplanicies parecen resultar de la coalescencia y la superposición de eventos de pediplanación. Hay registros de pediplanos que se formaron antes y después del establecimiento de las condiciones de extrema aridez climática en el Mioceno Medio. La formación de pediplanos parece estar gatillada fundamentalmente por cambios de nivel de base, que pueden, o no, estar asociados a episodios de alzamiento andino. La deducción de eventos climáticos discretos de significado regional, a partir de los eventos de retrabajo aluvial sobre peneplanicies y pediplanos, requiere de más datos de edades de exposición de superficie. No obstante, los datos disponibles parecen indicar el cese de la actividad aluvial sobre estas superficies a ~2 Ma.

Palabras Clave: Desierto de Atacama, Alzamiento andino, Paleoclima neógeno, Superficies de planación.

Financiamiento: Este estudio está siendo financiado por el Proyecto Fondecyt 1220987.

Referencias:

- Bissig, T., Riquelme, R., 2010. Andean uplift and climate evolution in the southern Atacama Desert deduced from geomorphology and supergene alunite-group minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.* 299 (3–4), 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.028>.
- Bouzari, F., Clark, A.H., 2002. Anatomy, evolution, and metallogenic significance of the supergene orebody of the Cerro Colorado Porphyry Copper Deposit, I Region Northern Chile. *Econ. Geol.* 97 (8), 1701–1740. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.97.8.1701>.
- Dohrenwend, J.C., Parsons, A.J., 2009. Pediments in arid environments. In: Parson, A.J., Abrahams, A.D. (Eds.), *Geomorphology of Desert Environments*, 2nd ed. Springer B.V. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9>.
- Evenstar, L.A., Mather, A.E., Hartley, A.J., Stuart, F.M., Sparks, R.S.J., Cooper, F.J., 2017. Geomorphology on geologic timescales: evolution of the late Cenozoic Pacific paleosurface in Northern Chile and Southern Peru. *Earth Sci. Rev.* 171 (April), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.004>.
- Sebastián Muñoz-Farías, Benedikt Ritter, Tibor J. Dunai, Jorge Morales-Leal, Eduardo Campos, Richard Spikings, Rodrigo Riquelme, 2022. Geomorphological significance of the Atacama Pediplain as a marker for the climatic and tectonic evolution of the Andean forearc, between 26° to 28°S. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108504>.
- Quang, C.X., Clark, A.H., Lee, J.K.W., Hawkes, N., 2005. Response of supergene processes to episodic Cenozoic uplift, pediment erosion, and ignimbrite eruption in the Porphyry Copper Province of southern Perú. *Econ. Geol.* 100 (1), 87–114. <https://doi.org/10.2113/100.1.0087>.
- Twidale, C.R., 1979. The character and interpretation of some pediment mantles. *Sediment. Geol.* 22 (1–2), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(79\)90020-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(79)90020-4).
- Twidale, C.R., Bourne, J.A., 2013. In: Do Pediplains Exist? Suggested Criteria and Examples, 57(October), pp. 411–428. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0116>.

Stratigraphy of the Proterozoic pre-collisional sedimentary basins of the Araçuaí Orogen, along the Espinhaço range, Minas Gerais, Brazil: geotectonic implications

Rogério Rodrigues da Silva¹

(1) Federal University of Minas Gerais, Department of Geology, Geosciences Institute, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, 31.710-550, Belo Horizonte/Minas Gerais, Brazil

The Araçuaí-West Congo Orogen comprises the northern portion of the South Atlantic Brasiliano Orogenic System, formed during the Neoproterozoic-Cambrian amalgamation of Western Gondwana. The orogen shows contacts to the west with the São Francisco Craton and to the east with the Congo Craton. It outlines a large arc, with an opening face to the south (Almeida 1977, **Figure 1A**). To the north, the Bahia-Gabon cratonic bridge, considered as part of the São Francisco Craton, constituted of rocks of Archean and Paleoproterozoic ages, physically limits the orogen. The cratonic bridge lasted from the Rhyacian Orogeny until its complete breakup in the Cretaceous, during the drift of the South American and African continents. Towards the south, the Araçuaí Orogen passes into the Brasiliano Ribeira Orogenic Belt (Pedrosa Soares et al. 2020).

The geological history of the Araçuaí Orogen began in the Tonian and lasted until the Ediacaran. There is substantial evidence to support the notion that it represents a complete Wilson cycle, involving a phase of distension followed by the convergence of tectonic plates (Caxito et al. 2022, Pedrosa-Soares et al. 2020). This orogeny resulted in the formation and preservation of tectonic constituents, representative of each phase of the Wilson cycle, including rift, drift, subduction, collision and collapse. This tectonic evolution distinctly characterizes the Araçuaí Orogeny and the broader South Atlantic Orogenic System (Caxito et al. 2022).

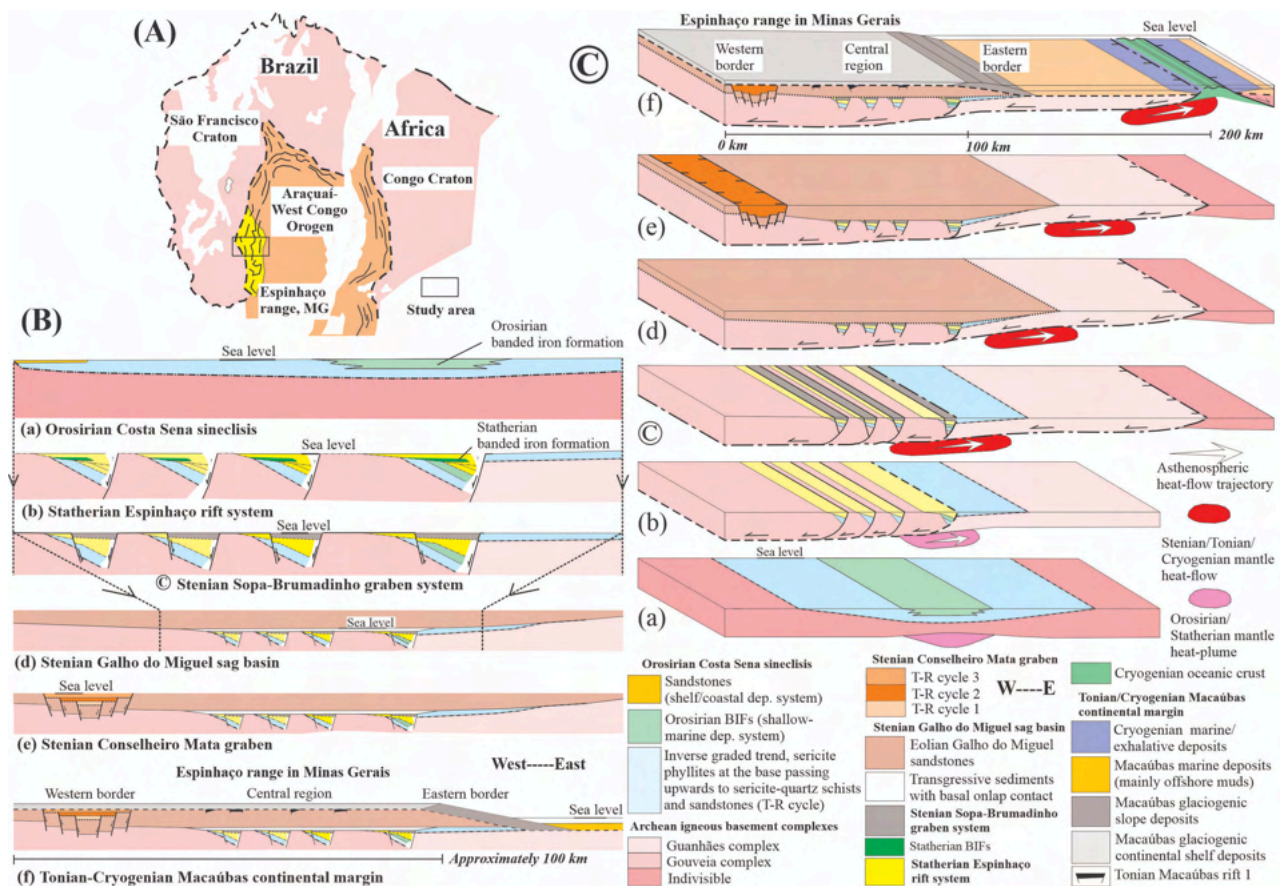


Figure 1. (A) Geotectonic setting of the Neoproterozoic Araçuaí Orogen with the location of the study area (after Pedrosa-Soares and Alkmim 2011, slightly modified). (B) Stratigraphic scheme of the Proterozoic pre-collisional basins of the Araçuaí orogen, exposed in the Espinhaço range, Minas Gerais. (C) A proposed tectonic-stratigraphic evolutionary model for the pre-collisional basins. Each basin or basin system is labeled with a letter, as shown in Figure 1B.

The Neoproterozoic Macaúbas basins are the precursor basins of the orogen, and were formed during the rift phase of the Wilson cycle. The initial continental rifts (rift 1) occurred approximately 930 Ma ago, followed by the development of a glaciogenic passive continental margin, around 900 Ma. The complete fragmentation of the Archean basement took place 700 Ma ago and is marked by the generation of a new oceanic crust (Pedrosa-Soares et al. 2020). The breakup of the Archean basement occurred through a symmetric rifting (pure shear deformation), according to Alkmim et al. (2017), or by asymmetric rifting (simple shear deformation), after Caxito et al. (2022).

Despite these discrepancies regarding how the crustal fragmentation occurred, these authors agree that the breakup of the Archean basement and the construction of the Macaúbas continental margin resulted from the rise of an asthenospheric mantle plume. These models do not consider the older pre-collisional basins as part of the continental breakup process, or any other geological process related to the construction of the orogen (Pedrosa-Soares et al. 2020, Pedrosa-Soares and Alkmim 2011).

The Proterozoic pre-collisional basins of the southern Espinhaço range are important stratigraphic records of the tectonic processes that occurred prior to build the Araçuai Orogen. These basins are younger than the Archean basement, reworked with lesser or greater intensity by the Rhyacian Orogeny, and are older than the Brasiliano Orogeny. They have experienced Ediacaran compressive tectonism and progressive metamorphism, contributing to the formation of the Espinhaço range in Minas Gerais, a chain of N-S spectacular mountains of paramount importance to the Araçuai Orogen. The following Proterozoic pre-collisional basins constitute the stratigraphic record of the southern Espinhaço range: (1) Orosirian Costa Sena sineclisis; (2) Statherian Espinhaço rift system; (3) Stenian Sopa-Brumadinho graben system; (4) Stenian Galho do Miguel sag basin; (5) Stenian Conselheiro Mata graben and (6) Tonian-Cryogenian Macaúbas rift/passive continental margin (**Figure 1B**).

The geochronologic ages of the pre-collisional basins of the Araçuai Orogen are well constrained and are generally not subject to disagreement (Chemale et al. 2012, Pedrosa-Soares et al. 2020). These basins have been included within the time interval known as the “boring billion years”, discouraging further efforts into geological mapping, stratigraphy, sedimentology and structural geology. This expression indicates a significant time interval, from the Orosirian to the Tonian, during which nothing or very little happened in tectonic evolutionary terms. This is not the case! The existence of a significant geological hiatus between the ages of some pre-collisional basins poses a challenge in terms of understanding their tectonic evolution, but it certainly does not make the task itself boring. This report aims to identify and characterize the stratigraphic and structural framework of the pre-collisional basins within the Araçuai Orogen (**Figure 1B**) and propose a tectono-stratigraphic model for these basins (**Figure 1C**). Detailed geological mapping of an extensive area of over 3,000 km² supports the stratigraphic scheme presented here. Sedimentological and paleogeographic reconstructions of the pre-orogenic basins were performed as well.

The deposits of the **Orosirian Costa Sena sineclisis** underwent significant erosion during the Statherian. The preserved sections comprise a complete transgressive-regressive cycle, characterized by an overall inverse-graded granulometric trend, varying from very-fine terrigenous rocks at the bottom, into sericite-quartz-schists and platformal sandstones at the top. The depocenter of the sineclisis is located along the eastern border of the cordillera, where the transgressive-regressive succession can reach thicknesses of up to 1.000 meters. In this area, very fine detritic rocks overlay the Archean basement, and expressive banded iron formations are exposed at the upper portions of the stratigraphic column (Rosière et al. 2019). The sineclisis likely represents an elongated N-S symmetric basin that formed through slow-down warping of the Archean basement complex. This warping allowed the ingress of the sea into continental areas, resulting in a transgressive-regressive sedimentary cycle. The sineclisis comprehends a submerged basin, with a depocenter connected with two gentle-dipping lateral slopes. The flexural subsidence occurs by crustal stretching without the involvement of normal faults, as evidenced by the absence of rudites of alluvial origin.

The **Statherian Espinhaço rift system** comprises four asymmetric rifts oriented in north-south direction. These rifts are bounded by syn-sedimentary normal faults that steeply dip to the west. Each rift within the system consists of an alluvial platform connected to an eastward-, gentle-dipping tectonic ramp, which transitions into an asymmetric depocenter. The rift system is filled by three distinct sequences. The older Olaria sequence is followed by the Natureza sequence with a notable angular unconformity separating these two basal sequences from the overlying São João da Chapada sequence. Statherian banded iron formations were mapped within the São João da Chapada sequence, and have been interpreted as basic volcanic rocks extruded during the rift evolution. Tectonic activity along the normal faults caused the basal unconformities to develop and the deposition of syn-tectonic rudites. Covering the basal rudites, transgressive, shallow marine sediments record marine incursions along the troughs of individual rifts. The stratigraphic architecture of the rift system indicates the presence of a significant extensional master fault, a detachment, connected to the normal faults of the individual rifts (Silva 1998). This master fault outcrops along the eastern border of the cordillera and is associated with a complex group of Statherian magmatic suites, comprising volcanic and plutonic alkaline rocks of variable compositions.

The **Stenian Sopa-Brumadinho graben system** is formed by four grabens, each limited to the east and west by N-S normal faults. The grabens occupy the same depositional locus as the older Espinhaço rifts. The system developed as a result of tectonic subsidence, mechanically absorbed by normal faults, most likely due to the reactivation of the older Espinhaço faults. The architecture observed in the area resembles typical grabens and horsts. The basal depositional surface of the grabens represents a geological hiatus of approximately 0.5 Ga. Mudstones and coastal sandstones directly overlay the top of the Espinhaço rift deposits. Each graben within the system is filled by two depositional systems. The basal system comprises mudstones and coastal sandstones, covered by sandstones and conglomerates bearing detrital diamonds, which build the upper deltaic depositional system. The episodic tectonic activity along the N-S normal faults resulted in repeated subsidence of the main graben troughs. The deposition within the grabens occurred in response to the accommodation space generated by the tectonically induced successive sea-level rises. Initially, transgressive sediments filled the grabens, followed by erosion and sedimentary transport from the source areas, feeding the progradation of the deltas. The characteristic external tabular shape of the deltaic deposits and the paleocurrent patterns are clues that the deltas were deposited on submerged tectonic ramps, gently inclined towards the east.

Following the Sopa-Brumadinho graben system, the **Stenian Galho do Miguel sag** developed as a flexural basin. The structural framework of the sag comprises a submerged depocenter, located in the central region of the cordillera, limited, to the east and west, by gentle-dipping subaerial lateral slopes. A marine transgressive succession covers the depocenter, showing westward basal onlap contact. This succession can reach a thickness of a few tens of meters. The siliciclastic succession at the bottom comprises shallow marine sandstones, covered by massive mudstones. Eolian quartz-sandstones typify the Galho do Miguel sag in the southern Espinhaço range.

These sandstones are thick and extensive, covering a vast area, from the eastern edge of the mountain range, passing through the central region and continuing westwards, towards the São Francisco Craton. Eolian deposits comprise fine quartz sandstones, which can reach a thickness of up to 2,000 meters. They represent a significant expansion of the basin, from its depocenter, where greater thicknesses occur, towards the east- and west-slopes. This tectonic framework, with subsidence of the submerged depocenter, coeval with the uplift of the subaerial lateral slopes, led to the development of the subaerial accommodation space, a necessary condition for the preservation of eolian sandstones in the stratigraphic record.

The **Stenian Conselheiro Mata graben** was deposited over the eolian sandstones of the Galho do Miguel sag, along the western contact of the Araçuaí Orogen with the São Francisco Craton. The stratigraphic record represents three transgressive-regressive cycles with thicknesses that can exceed 500 meters. These sedimentary cycles filled the graben and witnessed tectonic events immediately followed by marine transgressions, along gentle-dipping submerged platforms. Each cycle constitutes an initial phase that occurred as a result of tectonic activity along N-S normal faults, allowing the sea to invade continental areas.

Sedimentation primarily occurred on the floor of the grabens, with mudstones and shallow marine sandstones representing the beginning of the deposition. As erosion and transport intensified in the source areas, deposition gradually changed to deltaic, coastal, and shallow marine conditions, characterizing the regressive phase of the cycles.

The **Tonian/Cryogenian Macaúbas basin system** represents the youngest pre-collisional basins, commonly named the precursor basins of the Araçuaí Orogen. Its geological evolution initiated with continental rifting and evolved to a passive continental margin, resulting in a significant eastward shift of the depocenter position (Pedrosa-Soares et al. 2020). Concurrently, a notable glaciation occurred above the São Francisco Craton, located to the west of the orogen. This glaciation caused a significant glacio-eustatic sea-level fall, exposing the Serra do Espinhaço region to erosion. An eastward, gentle-dipping continental shelf, developed above a prominent planar unconformity, connecting the source area of the glaciers with the depocenter of the basin. Massive diamictites covered the continental platform. These deposits transition eastward to massive and stratified diamictites, interlayered with turbiditic sandstones, deposited in coastal and shallow marine environments on the talude of the continental margin. Below the talude, a significant topographic step formed, as more than 1,000 meters of eolian sandstones of the Galho do Miguel sag were severely eroded and transported away. Further east, the deposition of marine sediments across a vast area marks the existence of a large marine basin, formed above the Archean Guanhães complex.

Figure 1B illustrates the stratigraphy of the Proterozoic pre-collisional basins exposed in the Espinhaço range, Minas Gerais. Each basin represents a specific evolutionary stage, characterized by its own stratigraphic position and structural style, providing valuable information about the tectonic processes that took place during sedimentation. We identified six basins and/or basin systems, representing six distinct tectonic stages. An important aspect to consider is whether these basins are genetically related and whether they are associated with long-term geological processes. Our interpretation is that two distinct long-lived geological processes successively acted to compose the stratigraphic framework observed. A significant geological hiatus of approximately 0.5 Ga separates these geological processes. **Figure 1C** illustrates the proposed tectono-stratigraphic evolution for the pre-orogenic basins of the Araçuaí Orogeny.

The stratigraphic framework of the Orosirian/Statherian pre-collisional basins allows the interpretation that they are successor basins resulting from the same taphrogenic process. This process has begun with the development of an asthenospheric mantle plume, underneath the basement. As anatexis occurred at the base of the basement, a sineclisis was nucleated at the surface. Due to generalized anatexis, the Costa Sena sineclisis evolved until increasing temperature and pressure caused mechanical rupture of the basement. This was followed by the formation of the Statherian Espinhaço rift system. A taphrogenic detachment separates two distinct tectonic blocks. The western block known as Gouveia complex, preserves its original crustal thickness, while the extended Guanhães complex, located eastwards from the detachment, must exhibit reduced crustal thicknesses.

Three compelling geological evidences support the existence of an Orosirian/Statherian mantle plume beneath the Gouveia complex. The first evidence is the occurrence of intrusive igneous bodies in the basement, specifically porphyritic granites and leucogranites, with ages of approximately 1.8 Ga. These granites are interpreted to be the product of anatexis of the base of the continental crust. As such, their emplacement must have occurred during a distensive tectonic regime, caused by the rise of an asthenospheric mantle plume (Chaves and Coelho 2018).

The second line of evidence is the occurrences of banded iron formation in both the Orosirian Costa Sena sineclisis and the Statherian Espinhaço rift system. Mantle plumes located at the base of the basement provided the conditions for basic magmatism, with abundant hydrothermal Fe supply (Rosière et al. 2019). The upward flow of basic magma, from the asthenospheric mantle through the Archean basement, was facilitated by incremental crustal distention and thinning.

The third line of evidence refers to the complexity of Statherian volcanic and plutonic alkaline igneous rocks that occurs in association with the detachment of the Espinhaço rift system, exposed at the eastern border of the cordillera. The presence of a mantle plume, beneath the Archean basement, justifies this geological context, as intense magmatic activity and normal faults are commonly associated. The rifts structural asymmetry suggests that the displacement of the mantle plume occurred in an eastward direction.

During the early Stenian, the evolution of the pre-collisional basins recommenced when the temperature below the Gouveia complex was high enough to create a thermal heat flow, directed eastward, underneath the extended Guanhães complex. In a context of extensional tectonism, the displacement of heat flow, below a younger detachment, gives rise to the remaining, successor pre-collisional basins. The last stage of the taphrogenic process was the construction of the Tonian to Cryogenian Macaúbas passive continental margin.

All of the pre-collisional basins within the Araçuaí Orogen record the result of a complex and protracted taphrogenic process. This process resulted in a complete continental breakup related to the development, progression, and continued eastward movement of two distinct mantle plumes. The oldest plume activity took place beneath the Gouveia complex, represented today by the southern Espinhaço range, and it persisted throughout the Orosirian and the Statherian periods, forming the Costa Sena sineclisis succeeded by the Espinhaço rift system. After 0.5 Ga of tectonic stability, the younger mantle heat flow began to move eastwards beneath the Guanhães complex, starting from the Stenian to the Cryogenian/Ediacaran, during which formed the Sopa-Brumadinho graben system succeeded by the Galho do Miguel sag, Conselheiro Mata graben and, at last, the Macaúbas rift-continental margin. This taphrogenic process ended in the Ediacaran period, with the complete fragmentation of the Archean Guanhães complex and the formation of the juvenile oceanic crust.

Keywords: Brasiliano Araçuaí Orogen, pre-collisional basins, Proterozoic tectono-stratigraphic evolution

Acknowledgments: I want to thank and dedicate this work to my family, who always supported me.

References:

- Alkmim F.F., Kuchenbecker M., Reis H.L.S., Pedrosa-Soares A.C. 2017. The Araçuaí belt. In: São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. H. Heilbron, U.G. Cordani, Alkmim F.F. (Eds.), Regional Geology Reviews, Springer: 255-276.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 285-295.
- Caxito F.A., Hartmann L.A., Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Bruno H., Basei M.A.S., Chemale F. 2022. Multi-proxy evidence for subduction of the Neoproterozoic Adamastor Ocean and Wilson cycle in the South Atlantic Brasiliano Orogenic System of Western Gondwana. *Precambrian Research*, 376:1-34.
- Chaves A.O., Coelho R.M. 2018. Reinterpretação da ambiência tectônica de formação do leucogranito de Gouveia. *Geonomos*, 26(1): 51-55.
- Chemale Jr. F., Dussin I.A., Alkmim F.F., Martins M.S., Queiroga G., Armstrong R., Santos M.N. 2012. Unraveling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: the case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, 22(1): 200-206.
- Pedrosa-Soares A.C., Deluca C., Araujo C.S., Gradim C., Dussin I., Silva L.C., Babinsky M. 2020. O Orógeno Araçuaí à luz da geocronologia: um tributo a Umberto Cordani. In: *Geocronologia e Evolução tectônica do Continente Sul-Americano*. Editors: A. Bartorelli, W. Teixeira, B.B. Brito-Neves (Editors). Solaris Editora, 1ª. ed.: 250-271.
- Pedrosa-Soares A.C., Alkmim, F.F. 2011. How many rifting events preceded the development of the Araçuaí-West Congo craton? *Geonomos*, 19(2): 244-251.
- Rosière C.A., Bekker A., Rolim V.K., Santos J.O.S. 2019. Post-Great Oxidation Event Orosirian-Statherian iron formations on the São Francisco craton: Geotectonic implications. *Island Arc*; 28:e12300. <https://doi.org/10.1111/iar.12300>.
- Silva R.R. 1998. As bacias proterozóicas da Espinhaço e São Francisco em Minas Gerais: uma abordagem do ponto de vista da estratigrafia de seqüências. *Geonomos*, 6: 1-12.

Evolución del relieve en la isla de Chiloé: interacción entre procesos de subducción y rebote isostático glacial?

Lucia Sagripanti¹, María Pía Rodríguez²⁻⁷, Stephanie Brichau³, Claudio Saavedra Díaz⁶, Sebastien Carretier³, Andrés Echaurren⁴, Alfonso Encinas⁵, Andrés Folguera¹

- (1) Instituto de Estudios Andinos & Don Pablo Groeber (CONICET-UBA), Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
 (2) Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile
 (3) Géosciences Environnement Toulouse (GET), IRD, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France
 (4) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
 (5) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile
 (6) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile
 (7) Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología

En el antearco de los Andes Nordpatagónicos, la isla de Chiloé (42°S) representa un laboratorio natural para evaluar cómo las glaciaciones del Mioceno al Pleistoceno pueden haber interactuado con los procesos de subducción para modelar el paisaje en diferentes escalas temporales. Combinamos termocronología de trazas de fisión y de U-Th/He en apatito con análisis topográficos a gran escala (*swath profiles*, mapas de pendiente y profundidad de valle, reconocimiento de superficies remanentes de bajo relieve) para reconocer los rasgos morfológicos más antiguos de la isla y restringir su evolución en la escala de millones de años (Ma). También exploramos la evolución del paisaje posterior al Último Máximo Glacial (LGM) mediante el factor χ y un índice de empujamiento ponderado por la litología, k_{sn} (K), para comprender la respuesta del paisaje a la deglaciación en una escala de miles de años (Ka). En la parte centro-occidental de la isla, las superficies de bajo relieve se reconocen a elevaciones relativamente altas como remanentes del relieve más antiguo conservado en el paisaje actual de la isla. Aquí, nuestros datos termocronológicos evidencian una exhumación acelerada en respuesta a un evento de alzamiento que tuvo lugar estrictamente después del Mioceno Tardío (posterior a 6 Ma). El relieve y la distribución de las pendientes de las superficies remanentes son consistentes con un sistema de fallas de vergencia al oeste reconocido mar adentro en Chiloé (Echaurren et al., 2022) y con el desarrollo de un antiforme de basamento en la parte centro-occidental de la isla, la Cordillera de Piuchén, evidenciado en los perfiles *swath* de elevación. El análisis del factor χ muestra que sobre la Cordillera de Piuchén actualmente se desarrolla una divisoria de aguas que migra al este, lo que sugiere que el paisaje de la Cordillera de Piuchén todavía se está adaptando a la deformación inducida por el sistema de vergencia oeste. Durante el LGM, estudios previos indican que el 80% de la isla estuvo cubierta por hielo y la Cordillera de Piuchén actuó como una barrera topográfica positiva para los flujos glaciares procedentes del este (Davies et al., 2020), lo que es consistente con el modelamiento termocronológico en la parte este de la Cordillera de Piuchén, donde no se observan eventos de exhumación posteriores al Mioceno Temprano. Los mapas de χ muestran que, tras la deglaciación, se desarrolló una divisoria de aguas NE-SW a lo largo de la parte oriental de la isla y cerca de su costa oriental, que se encuentra en un estado de desequilibrio y se caracteriza por una migración hacia el oeste. Los valores más altos del índice k_{sn} (K) se observan en áreas que estuvieron cubiertas por hielo durante el LGM, concentrándose principalmente al este de esta divisoria de aguas, pero mostrando también un patrón disperso al sur de la Cordillera de Piuchén y a lo largo de su borde oriental.

Nuestros resultados sugieren que, en una escala de Ma, el alzamiento y la exhumación en la isla de Chiloé han sido controlados principalmente por procesos que tienen lugar en la interfaz de la placa, muy probablemente la acreción tectónica inducida por un mayor aporte de sedimentos a la fosa (Melnick y Echtler, 2006; Melnick et al., 2009; Encinas et al., 2021) debido al aumento de la erosión glacial desde el Mioceno Tardío (Thomson et al., 2010; Herman y Brandon, 2015). A la escala de Ka, tras el LGM, nuestros resultados indican que el paisaje de las partes oriental y meridional de la isla podría haber respondido a la deglaciación mediante la generación de un relieve positivo de gran amplitud, similar a los terrenos que han sufrido un rebote isostático glacial.

Palabras Clave: Rebote Isostático, LGM, exhumación, análisis del relieve

Referencias:

- Davies, B.J., Darvill, C.M., Lovell, H., Bendle, J.M., Dowdeswell, J.A., Fabel, D., García, J.-L., Geiger, A., Glasser, N.F., Gheorghiu, D.M., Harrison, S., Hein, A.S., Kaplan, M.R., Martin, J.R.V., Mendelova, M., Palmer, A., Pelto, M., Rodés, A., Sagredo, E.A., Smedley, R.K., Smellie, J.L., Thorndycraft, V.R., 2020. The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth Sci. Rev.* 204, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152>.
- Echaurren, A., Encinas, A., Sagripanti, L., Gianni, G., Zambrano, P., Duhart, P., Folguera, A., 2022. Fore-to-retroarc crustal structure of the north Patagonian margin: How is shortening distributed in Andean-type orogens?
- Encinas, A., Sagripanti, L., Rodríguez, M.P., Orts, D., Anavalón, A., Giroux, P., Otero, J., Echaurren, A., Zambrano, P., Valencia, V., 2021. Tectonosedimentary evolution of the Coastal Cordillera and Central Depression of south-Central Chile (36°30' – 42° S). *Earth Sci. Rev.* 213, 103465.
- Herman, F., Brandon, M., 2015. Mid-latitude glacial erosion hotspot related to equatorial shifts in southern Westerlies. *Geology*, 43, 987-990. [doi:10.1130/G37008.1](https://doi.org/10.1130/G37008.1).
- Melnick, D., and Echtler, H.P., 2006. Inversion of forearc basins in south-central Chile caused by rapid glacial age trench fill. *Geological Society of America*, 34, 9: 709-712. [doi: 10.1130/G22440.1](https://doi.org/10.1130/G22440.1).
- Melnick, D., Bookhagen, B., Strecker, M.R., Echtler, H.P., 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *J. Geophys. Res.* 114, B01407.
- Thomson, S., Brandon, M., Tomkin, J., Reiners, P.W., Vásquez, C., Wilson, N.J., 2010. Glaciation as a destructive and constructive control on mountain building. *Nature* 467, 313-317.

Evolución Neógena-Cuaternaria del paisaje de la Cordillera de la Costa entre Taltal y Puerto Viejo en un clima de hiperaridez: Reconstrucción mediante un análisis morfométrico

Rodrigo Riquelme Retamal¹, María Pía Rodríguez¹, Matías Valencia¹

(1) Universidad de Atacama, Geología, Ingeniería, Avenida Copayapu 485, Copiapó, Chile

Entre Taltal y Puerto Viejo (25°30'S - 27°20'S), la Cordillera de la Costa constituye una cadena montañosa con orientación norte - sur, la cual presenta una elevación máxima alrededor de los 2000 m.s.n.m. Su principal característica estructural es el Sistema Falla de Atacama (SFA), que se constituye por un conjunto de fallas discontinuas y superpuestas subparalelas al margen continental, siendo sus tres ramas: Oeste, Central y Este. Además, la rama Este del SFA segmenta la Cordillera de la Costa en un bloque Oeste y Este.

Riquelme y otros (2003), quienes estudiaron las curvas e integrales hipsométricas en las cuencas de orden 2 de la Quebrada Salitrosa (26°50' S), señalan que existe una preponderancia de la incisión en bloque Oeste de la Cordillera de la Costa. Mientras que, el bloque Este está siendo rellenado por sedimentos. El contraste se interpreta como un alzamiento diferencial de la Cordillera de la Costa, en donde, el bloque Oeste se estaría alzando con mayor velocidad versus el bloque Este. Sin embargo, mediante un análisis bibliográfico y geomorfológico de gran escala, se puede observar que la distribución de los antiguos niveles base en los sistemas fluviales, sugieren que también existen quiebres geomorfológicos desde una perspectiva norte - sur. Es aquí una posibilidad de poder comprender con mayores detalles la dinámica del alzamiento contenido en la Cordillera de la Costa.

En el área de estudio, se llevó a cabo un análisis que contempla la obtención de superficies de baja pendiente-rugosidad (Bowles y Cowgill, 2012), *knickpoints* (Schwanghart y otros, 2021), índice ksn (forte y whipple, 2019) y factor χ (Guerit y otros, 2018). Como imagen raster se utilizó una SRTM de 30 metros (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y, los softwares ArcGIS y MATLAB.

Las superficies de baja pendiente ($<10^\circ$) y rugosidad (media + desviación estándar) representan planicies dentro del paisaje, las cuales se pueden observar en toda la zona de estudio, sin embargo, existe una mayor concentración areal desde Taltal hasta Chañaral. Los *knickpoints* se ubican solamente en el bloque Oeste de la Cordillera de la Costa y con una mayor preponderancia cercana a la costa entre Taltal y Chañaral. Los saltos o quiebres de elevación (asociados al perfil longitudinal del río) varían desde los 75 hasta los 300 metros. El índice ksn muestra que, los valores mayores a 200 se ubican aguas abajo de los *Knickpoints*, para luego, disminuir considerablemente aguas arriba. El factor χ , al comparar sus valores en las divisorias de aguas de las cuencas de orden 6 y 5, se observan perturbaciones en las cercanías de los *knickpoints* y, al Sistema Falla de Atacama, en donde, las cuencas con mayor área drenada están ampliando su divisoria de aguas hacia las de menor área drenada.

Los *knickpoints* en su gran mayoría son diferenciales y se ubican en fallas antiguas contenidas en el basamento Paleozoico y/o arco volcánico del Jurásico, con excepción en la cuenca del río Copiapó, en donde, todos son migratorios y se hallan en el Sistema Falla de Atacama. Hay cuencas que presentan más de un *knickpoint* y sus valores de ksn aguas abajo y arriba de cada uno, contrastan de una manera en la cual se interpreta que se generaron en tiempos distintos. Existen valores de ksn muy elevados (>400) que se encuentran solamente en lugares cercanos a donde se observa el farellón costero.

Si bien Riquelme y otros (2003) señalan que la Cordillera de la Costa se estaría alzando de manera diferencial desde el Mioceno medio hasta la actualidad, las nuevas evidencias obtenidas sugieren que, el bloque Oeste se puede dividir en sub-bloques y que, sus límites lo constituyen fallas o estructuras antiguas contenidas en el basamento, las cuales están siendo reactivadas de manera asincrónica.

Palabras Clave: Alzamiento, Morfometría, Sistema Falla de Atacama.

Referencias:

- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., Darrozes, J., Charrier, R., 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics* 361, 255–275.

Reconstrucción paleoambiental del Salar de Tara durante el Holoceno Temprano desde los estudios geopatrimoniales y transdisciplinarios

Marco Vásquez Calahuana¹, Rodrigo Riquelme Salazar¹, Valentina Figueroa Larre², Rodrigo Loyola Muñoz²⁻³, Lautaro Núñez Atencio², Christian Espíndola Araya⁴, Camilo Sanzana Portiño⁴, Félix Galleguillos Aymaní⁴, Manuel Prieto Montt⁵

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, De Ingeniería, Av. Angamos #0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo, Tebenquiche entre Av. del Inca y Camino del Inca, San Pedro de Atacama, Chile

(3) Université Paris Nanterre, UMR 8068 Technologie et Ethnologie des Mondes Préhistoriques, 200 Av. de la République, 92000 Nanterre, France, Paris, Francia

(4) Comunidad Atacameña de Toconao, Unidad de Territorio y Aguas, Latorre 210, San Pedro de Atacama, Chile

(5) Universidad de Tarapacá, Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas, Facultad de Educación y Humanidades, 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile

El Salar de Tara (22° 01' 59" S, 67° 16' 30" W; 4,300 m.s.n.m.) es un salar tipo playa, con una superficie de 48 km², una superficie de cuenca de 2035 km², que abarca parte de la Puna entre Chile, Bolivia y Argentina. Los principales ingresos de agua al sistema hídrico son por precipitaciones (150 mm/año) y por escorrentía superficial, por el río Zapaleri (400 l/s) y estero Cueva Pintada por el este; y los ríos Chico y Huailitas por el oeste; además de manantiales (~200 l/s) dispersos por lado oeste del salar. Mientras que las salidas son por evaporación (evaporación potencial 1500 mm/año) e infiltración [8]. Se ubica en el borde occidental de la Puna de Atacama, dentro de la Reserva Nacional los Flamencos, en el territorio ancestral de la Comunidad Atacameña de Toconao.

El Salar de Tara contiene un registro de paleocostas que permite estudiar las variaciones hídricas asociadas a los cambios climáticos del Pleistoceno tardío - Holoceno temprano. Por su posición geográfica presenta la oportunidad de correlacionar la historia paleoclimática de la Puna de Atacama con la historia paleoclimática del margen oriental del Desierto de Atacama. Preguntas que están en la base de nuestra investigación son: ¿Cuál es la relación temporal de las paleocostas de Tara con aquellas que permitieron definir los eventos de máximos niveles lacustres Tauca y Coipasa en el Salar de Uyuni [2,6]?- por otra parte, considerando que estas paleocostas contienen sitios arqueológicos con edades Holoceno temprano [4], vale preguntarse, ¿Cómo se articula la historia paleoclimática que es posible definir a partir de estas paleocostas, con los eventos pluviales Cape 1 y 2, definidos en el borde oriental del Desierto de Atacama [1,7,5]?

Con la finalidad de reconstruir los eventos paleoclimáticos de Tara y relacionarlos con eventos regionales, estamos realizando una investigación transdisciplinaria que combina metodologías procedentes de la geología, arqueología, geografía y de las metodologías indígenas. Nuestro propósito es comprender cómo las condiciones paleoambientales del Salar de Tara durante el Pleistoceno tardío - Holoceno temprano condicionaron los recursos hídricos, consecuentemente, vegetales y faunísticos, que permitieron el establecimiento de asentamientos humanos reconocidos en los sitios arqueológicos tempranos (14000-8000 a AP) situados en los bordes de este salar [3,4]. Se realizarán i. cartografías de las paleocostas; ii. una correlación cronológica relativa con las paleocostas que permitirán definir los máximos lacustres de Tauca y Coipasa en la Puna y iii. una relación cronológica relativa de las paleocostas con los sitios arqueológicos.

Palabras Clave Tauca-Coipasa, paleocostas, sitios arqueológicos, paleoclima, salares.

Financiamiento: Comunidad Atacameña de Toconao, FONDECYT N°1201603, IRP-MINES ATACAMA.

Agradecimientos: ECOS-ANID C19H05 y al FIC-R BIP 40046897-0 Nueva Escuela Andina.

Referencias:

- [1] De Souza, P., Cartajena, I., Riquelme, R., Maldonado, A., De Porras, M., Santander, B., Núñez, L., Díaz, L. (2021). Late Pleistocene–Early Holocene human settlement and environmental dynamics in the southern Atacama Desert highlands (24.0°S–24.5°S, Northern Chile). *Geoarchaeology*. 10.1002/gea.21849.
- [2] Nunnery, J., Fritz, S., Baker, P., Salenbien, W. (2018). Lake-level variability in Salar de Coipasa, Bolivia during the past 40,000 yr. *Quaternary Research*. 91, 1-11. 10.1017/qua.2018.108.
- [3] Núñez, L., Loyola, R., Cartajena, I., López M.P., Santander, B., Maldonado, A., De Souza, P., G., Carlos. (2018). Miscanti-1: Human occupation during the arid Mid-Holocene event in the high-altitude lakes of the Atacama Desert, South America. *Quaternary Science Reviews*. 181.
- [4] Nuñez, L. (2005). Ocupaciones humanas y paleoambientes en la Puna de Atacama. Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo, Universidad Católica del Norte, San Pedro de Atacama – Taraxacum, 480 p.
- [5] Latorre, C., Betancourt, J.L., Arroyo, M., (2006). Late quaternary vegetation and climate history of a Perennial River Canyon in the Río Salado Basin (22S) of Northern Chile. *Quat. Res.* 65, 450e466.
- [6] Placzek CJ, Quade J, Patchett PJ (2013) A 130 ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano. *Earth Planet Sci Lett* 363:97–108. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.017>.
- [7] Quade, J., Rech, J., Betancourt, J. L., Latorre, C., Quade, B., Rylander, K. A., & Fisher, T. (2008). Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary Research*, 69, 343–360.
- [8] Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). Geoquímica de Aguas en Cuenclas Cerradas: Volumen III. Convenio de Cooperación Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-Universidad Católica del Norte (UCN)-Institut de Recherche Pour Le Développement (IRD) (ex Orstom): 251p.

Evaluación de fuentes de sedimento en la cuenca del Maipo Alto (33°S) y el rol de remociones en masa en cuencas semiáridas de montaña

Tania Villaseñor¹, Ismael Contreras Millar², Valentina Flores Aqueveque², Raúl Valenzuela¹, Alida Perez-Fodich², Marco Pfeiffer³

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Av. Santa Rosa 11315, Santiago, Chile

Los sistemas fluviales son un elemento clave en la transferencia de sedimentos a través de los paisajes. A escala global, las pequeñas cuencas montañosas tienen una producción de sedimentos relativamente alta y responden rápidamente a las perturbaciones en los procesos de generación de sedimentos. La cuenca alta del río Maipo es una cuenca montañosa situada en la región semiárida de Chile central (33°S). Los caudales en esta cuenca siguen un régimen nival, donde tanto los flujos de agua como de sedimentos han disminuido en los últimos años como resultado de una sequía de una década de duración. En este trabajo se presenta un análisis de proveniencia en base a la composición isotópica de Sr y Nd de la carga de sedimentos en suspensión colectados durante el periodo de mayor descarga (correspondiente a la estación seca y el período de deshielo en el verano austral) entre noviembre 2019 y marzo 2021. El objetivo de estos análisis es identificar las zonas de la cuenca que producen sedimento y los mecanismos de generación, y evaluar su variabilidad temporal en un contexto de megasequía y un evento de precipitación extrema. Los resultados indican que la generación y transferencia de sedimentos ocurre principalmente en las cabeceras de la cuenca, lugar donde se encuentran glaciares de montaña. La composición isotópica del sedimento apunta a sectores muy específicos de la cabecera, cubiertos actualmente por glaciares, lo que sugiere un rol importante del deshielo de los glaciares y su contribución a la escorrentía que moviliza sedimentos aguas abajo. Sin embargo, también se consideran otros sectores de la cabecera que se cubren de nieve en invierno y pueden aportar sedimento por escorrentía durante su derretimiento en primavera. Este patrón de generación de sedimentos cambió durante un evento extraordinario de precipitación estival durante el 28-31 de enero de 2021 que resultó en una precipitación acumulada de hasta 100 mm y una isoterma 0°C elevada (~3.000 m s.n.m.). Este evento desencadenó una serie de remociones en masa en la cuenca alta del Maipo que ocurrieron principalmente después de las intensas precipitaciones del 31 de enero. Una base de datos de eventos de remociones en masa fue construida en función de lo reportado por Sernageomin, habitantes del sector a través de redes sociales y medios de comunicación, los que corresponden principalmente a flujos de detritos que fueron encausados por quebradas que tributan a los cursos fluviales de la cuenca. Los análisis de procedencia de las muestras de sedimentos en suspensión recolectadas 24 horas después del evento de precipitación muestran una composición distinta a la usual, la cual corresponde a fuentes localizadas en las partes medias a bajas de la cuenca (~1.000-3.000 m s.n.m.), lo que coincide con la ubicación de las remociones en masa reportadas. Esto sugiere que los sedimentos generados y movilizados por estos flujos superaron a las rutas normales de transferencia de sedimento de la estación seca en la cuenca superior del Maipo y fueron rápidamente transferidos al canal fluvial principal. La influencia de las remociones sobre la composición del sedimento es favorecida por la cubierta de nieve por encima de los 3.000 m s.n.m. que inhibió la descarga de sedimentos desde las regiones superiores de la cuenca — que usualmente generan y transfieren sedimentos — durante los días del evento meteorológico. Los resultados de la proveniencia de los sedimentos en suspensión recogidos un mes después del evento de precipitación muestran características similares previas al evento climático extremo, indicando el restablecimiento de las condiciones normales de generación y transferencia de sedimentos en este sistema. Nuestros resultados ponen de relieve el rol de la generación de sedimento en zonas acotadas de la cuenca y el efecto de los eventos de remociones en masa generados por condiciones extremas de precipitación tanto en la fuente como en el balance de sedimentos en cuencas semiáridas montañosas. Estos resultados también muestran el potencial de los estudios de proveniencia de sedimento para la interpretación de eventos similares en el registro estratigráfico.

Palabras Clave: proveniencia, remociones en masa, Chile central, sedimentos fluviales.

Financiamiento: PAI 77190019, FONDECYT 11220507.

Dinámica hidromorfológica y evolución del paisaje en corredores fluviales afectados por actividad eruptiva reciente (2008 – 2015) en los Andes del Sur de Chile

Valeria Zingaretti¹, Rosario Florin Gutierrez², Karla Sánchez³, Andrés Iroumé⁴, Bruno Mazzorana^{4,5}

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (2) Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Hidromorfología, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (3) Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Hidromorfología, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (4) Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Hidromorfología, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
 (5) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Edificio Pugin, oficina 339, Valdivia, Chile

Las erupciones volcánicas explosivas ejercen grandes impactos geomorfológicos en los sistemas hídricos, como el llenado de los valles fluviales, la redefinición de la red de drenaje, el daño de la vegetación ribereña y el cambio morfológico del canal activo. Los diferentes procesos eruptivos, como lahares y flujos piroclásticos, alteran el régimen hidrológico inmediatamente después de la erupción, principalmente con el gran aporte de material, modificando profundamente el patrón de drenaje y la geometría de los corredores fluviales; en menor medida la caída de tefra afecta a la geomorfología.

En este trabajo se compararon tres erupciones volcánicas recientes de gran tamaño ($VEI \geq 4$) ocurridas en el norte de la Patagonia chilena: la del volcán Chaitén el año 2008, del Puyehue-Cordón Caulle (PCC) el año 2011 y del Calbuco el año 2015. Se compiló y sistematizó datos y parámetros físicos descritos en la literatura con el fin de caracterizar y contrastar la dinámica de dichos eventos en los sistemas fluviales proximales, y los distintos procesos desencadenados. Posteriormente, se analizó mediante fotogrametría digital los cambios geomorfológicos ocurridos durante los años post-eruptivos, con el objetivo de analizar la dinámica erosiva y el ajuste de los ríos.

Los cambios en el área del canal activo de cada zona estudiada se calcularon en el software ArcGIS Pro®, utilizando los ortomosaicos creados a partir del primer y último vuelo de las zonas de estudio, para lo cual se delimitó el canal activo y se calculó el área erosionada en hectáreas.

De los tres eventos estudiados, las erupciones del volcán PCC y Chaitén presentaron mayores similitudes, siendo más explosivas que la erupción del volcán Calbuco. Estas dos erupciones, plinianas y de VEI 4-5, se caracterizaron por tener una corta pero intensa fase explosiva seguidas de una fase efusiva de varios meses de duración, con grandes volúmenes de tefra eyectados y productos volcánicos predominantemente ácidos. Mientras que la erupción del volcán Calbuco, subpliniana y de VEI 4, presentó sólo una fase explosiva de mayor duración, con menor volumen de material piroclástico y composición intermedia. La dispersión de las cenizas fue predominantemente al SE para el PCC, NE para el volcán Calbuco y dirección E para el caso del volcán Chaitén. En todos los casos de estudio se evidenció la ocurrencia tanto de flujos piroclásticos como de lahares, que canalizaron por distintos corredores fluviales presentes en los flancos del volcán, modificando abruptamente sus condiciones de carga y generando distintas respuestas en su dinámica hidromorfológica. Para este trabajo se consideraron los ríos más afectados por estos procesos eruptivos, que fueron el río Blanco en Chaitén, el río Nilahue en PCC y el río Blanco Este en Calbuco.

La respuesta morfológica en los corredores fluviales monitoreados se caracteriza por la reducción del número de barras en el río Nilahue, río Blanco Este y río Blanco, sin embargo la dinámica de ajuste ha presentado diferencias. En un período de seis años el río blanco de Chaitén ha disminuido el ancho del canal activo y el patrón de la red de drenaje es más sinuoso, infiriendo un inicio a un estado de equilibrio dinámico del río. El río Nilahue de PCC en un año de análisis mantiene el ancho del canal activo y una red de drenaje trezada. Por último, el río Blanco Este Sur de Calbuco en ocho años de monitoreo presenta un aumento del ancho del canal activo pero con una lámina de agua única y sinuosa aparentemente estabilizando por el aumento de la incisión.

Palabras Clave: erupciones volcánicas, sistemas fluviales, fotogrametría, dinámica hidromorfológica.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt PIROSED1200079: Understanding changes in river corridors after volcanic eruptions: secondary effects, cascading processes and eco-hydrosedimentary mechanisms.

Agradecimientos: Agradecemos al Proyecto Fondecyt PIROSED1200079 liderado por el Dr. Andrés Iroumé y al Project Fondecyt-ANID Nr. 1200091 (SEDIMPACT) liderado por Bruno Mazzorana.

Referencias:

- Bertin, D., Amigo, Á., Lara, L. E., Orozco, G., & Silva Parejas, C. (2012). Erupción del Cordón Caulle 2011-2012: Evolución fase efusiva. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 539–541.
- Bertin, D., Amigo, Á., Mella, M., Astudillo, V., Bertin, L., & Bucchi, F. (2015). Erupción del volcán Calbuco 2015: Estratigrafía eruptiva y volumen involucrado. XIV Congreso Geológico Chileno, 132–135.
- Castruccio, A., Clavero, J., Segura, A., Samaniego, P., Roche, O., Le Pennec, J. L., & Droguett, B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78(9).
- Iroumé, A., Paredes, A., Garbarino, M., Morresi, D., Batalla, R. J. (2020). Post-eruption morphological evolution and vegetation dynamics of the Blanco River, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 104(), 102809.
- Lara, L. E., Amigo, Á., Silva, C., Orozco, G., & Bertin, D. (2012). La erupción 2011-2012 del Cordón Caulle: antecedentes generales y rasgos notables de una erupción en curso. In *Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, August* (Vol. 13).
- Major, J. J., & Lara, L. E. (2013). Revisión del volcán Chaitén y su erupción 2008-2009. *Chile. Andean Geology*, 40(2), 196–215.
- Major, J. J., Pierson, T. C., Hoblitt, R. P., & Moreno, H. (2013). Flujos piroclásticos asociados a la erupción 2008-2009 del volcán Chaitén: Perturbación del bosque, depósitos y dinámica. *Andean Geology*, 40(2), 324–358.

Caracterización geológica y paleontológica de ictiosaurios calovianos de la Formación Profeta: implicancias paleobiogeográficas durante el Jurásico en la Región de Antofagasta

Herasmo Ignacio Araneda Ruiz¹, Guillermo Chong Díaz², David Rubilar-Rogers³

(1) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Plaza 680, Las Condes, Santiago, Chile.

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias de la Tierra, Angamos 06016, Antofagasta, Chile.

(3) Museo Nacional de Historia Natural, Área de Paleontología, Parque Quinta Normal, Santiago, Chile.

El registro fósil de ictiosaurios (Reptilia: Ichthyosauria) en Chile proviene de dieciséis localidades distribuidas entre cinco regiones del país. Sin embargo, tanto por el grado de completitud de sus esqueletos como por número de especímenes reportados, sólo el material proveniente unidades geológicas del Cretácico temprano de Magallanes ha proporcionado información paleontológica lo suficientemente detallada como para efectuar una identificación taxonómica más completa de estos vertebrados marinos. En lo que respecta al sector norte de Chile, casi la totalidad de los fósiles descritos como restos de ictiosaurios corresponden a materiales fragmentarios que aportan poca información significativa en términos taxonómicos. Adicionalmente y de forma general, la investigación sobre el contexto geológico preciso de estos hallazgos ha sido limitada y tampoco se han realizado búsquedas específicas de ejemplares más representativos que puedan aportar información relevante.

Este trabajo tiene carácter de preliminar y su objetivo es el estudio paleontológico y geológico de restos fósiles recolectados en afloramientos jurásicos de la Formación Profeta en Sierra de Varas, Cordillera de Domeyko, Región de Antofagasta. Las descripciones anatómicas preliminares tienen como propósito realizar una asignación taxonómica más precisa; para así establecer comparaciones con otros ejemplares reportados y finalmente integrar la información obtenida en un contexto cronoestratigráfico y tectonoestratigráfico. Esto permite establecer algunas correlaciones con la evolución del margen andino del norte del territorio nacional y provee pistas acerca de la paleogeografía y paleobiogeografía de este sector del borde occidental de Gondwana, desde el Triásico tardío hasta fines del período Jurásico. En este lapso de tiempo, en el cual se enmarca la primera etapa del Ciclo Andino, habría existido una antigua cuenca de trasarco de carácter marino de la cual la Formación Profeta conserva un registro estratigráfico continuo.

Palabras Clave: Ictiosaurios, Formación Profeta, Cronoestratigrafía, Paleobiogeografía.

Referencias:

- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En *The Geology of Chile* (pp. 21-114). (Geological Society Special Publication).
- Chong, G. (1973). Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, provincia de Antofagasta. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 1-284 Santiago.
- González, R.; Wilke, G.-H.; Menzies, A.H.; Riquelme, R.; Herrera, C.; Matthews, S.; Espinoza, F.; Cornejo, P. (2015). Carta Sierra de Varas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 178, 1 mapa escala 1:100.000.
- Pardo-Pérez, J.; Otero, R.A.; Suárez, M.E. (2015). Síntesis del registro fósil de ictiosaurios (Reptilia: Ichthyosauria) en Chile. In: Rubilar-Rogers, D.; Otero, R.A.; Vargas, A.; Sallaberry, M. (eds.), *Vertebrados Fósiles de Chile*. Publicación Ocasional del Museo Nacional de Historia Natural, Chile, 63: 113-150.

Estratigrafía y petrografía del sector cerro Rosado, localidad de Villa Ortega, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

Pedro Antonio Cea Álvarez¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

En la Cordillera Patagónica de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, situada entre las coordenadas 45°20'-45°23'S y 72°09'-72°05'W, a una distancia aproximada de 23 km al noroeste de la ciudad de Coyhaique, se encuentran expuestas rocas ígneas extrusivas, volcanoclásticas y sedimentarias (carbonáticas y siliciclásticas), con un espesor mínimo aproximado de 520 metros.

En la zona de estudio se realizaron tres columnas estratigráficas en afloramientos del sector cerro Rosado. La primera columna, denominada R1.E1, se realizó inmediatamente al noroeste del cerro y expone una sucesión de rocas volcanoclásticas con intercalaciones de calizas de tipo *bindstone*. La segunda columna, R1.E2, realizada al oeste de la primera columna corresponde a una sucesión de rocas volcanoclásticas con predominio de brechas y tobas, destacando estas últimas por los troncos fósiles bien preservados. Finalmente, la columna R2.E1, se realizó al oeste del cerro Rosado (suroeste del área de estudio), La sucesión corresponde casi en su totalidad a rocas volcanoclásticas, con predominio de tobas y areniscas volcánicas.

Las unidades litológicas del cerro Rosado se caracterizan por incluir rocas volcanoclásticas y sedimentarias siliciclásticas, de origen continental, y sedimentarias carbonáticas, de origen marino somero. Las principales litologías en el área las conforman tobas de lapilli y de ceniza de composición cristalina, lítica y vítrea, además de brechas piroclástica y areniscas de granulometría fina a media; subordinadamente se observan calizas. Lo anterior permitió describir un total de diecisiete facies y definir cinco asociaciones de facies, lo que permitió sugerir dos ambientes de sedimentación principales, aluvial y marino somero (ambientes mareales restringidos), cercano a un arco volcánico activo.

De acuerdo a las descripciones litológicas y granulométricas es posible agrupar los depósitos volcanoclásticos y sedimentarios respecto a su proximidad al centro eruptivo en tres facies: facies proximales, facies intermedias y facies distales. Las facies proximales incluyen flujos lávicos y depósitos volcanoclásticos, en particular aquellos más gruesos como tobas de lapilli y brechas piroclásticas. Por otra parte, las facies intermedias representan la sedimentación de material volcanoclástico y sedimento siliciclástico como flujos laminares o de granos y oleadas piroclásticas. Finalmente, las facies distales evidencian la sedimentación terminal por lo que se encuentran mayor abundancia de depósitos de flujo laminar de granulometría fina y depósitos de caída de piroclastos; asociado a estas secuencias se encontraría el material fósil correspondiente a madera y restos foliares.

El ambiente marino somero está representado por las litofacies carbonáticas y siliciclásticas de grano fino a muy fino. Las laminaciones algales, de tipo paralela y onduladas, junto a estructuras fenestrales evidencian una sedimentación en llanuras mareales, las cuales varían entre secciones supramareales, intermareales y submareales. La sedimentación de estas secuencias carbonáticas se dispone sobre una superficie de tipo *hardground*, interrumpida por eventos esporádicos de sedimentación volcanoclástica. Se le asigna a este ambiente los restos fósiles, gastrópodos y bivalvos, encontrados en rodados de la zona de estudio.

A partir de observaciones en terreno se puede señalar un desarrollo continuo en la evolución de la secuencia, donde no se distinguen contactos discordantes entre capas. Los datos litológicos permiten realizar una correlación estratigráfica entre las tres columnas. En consecuencia, se establece una relación entre los afloramientos de R1.E2 y R2.E1 basándose en una capa portadora de flora fósil, estrato que se considera como el mismo depósito de flujo piroclástico en ambas columnas. Las mediciones de manteo junto a su ubicación y topografía, permite establecer una relación en donde R1.E1 sobreyace R1.E2. La variación en la vertical de la sucesión establece un predominante dominio volcánico en la base, con mayores aportes sedimentarios carbonáticos hacia el techo.

Finalmente, a partir de las interpretaciones y observaciones realizadas en terreno junto a una revisión bibliográfica, de las áreas adyacentes a la zona de estudio y de la geología regional, es posible sugerir que las rocas encontradas en el sector cerro Rosado forman parte de la compleja sedimentación mixta desarrollada durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Esta sucesión de rocas puede interpretarse como parte de las formaciones Ibáñez y Toqui, lo cual sugiere un rango de edad para la secuencia que va desde el Titoniano hasta el Valanginiense; esta interpretación además se relaciona en la posible presencia de calpionélidos en las rocas carbonatadas.

Palabras Clave: Estratigrafía, Petrografía, Cuenca de Aysén, Mesozoico, Cerro Rosado.

Análisis multiproxies de sedimentos lacustres del Altiplano de Arica y Parinacota para dilucidar la historia climática Holocena y efectos antrópicos

Catalina Céspedes Pacheco¹, Héctor Pizarro¹, Adriana Aránguiz-Acuña²⁻³, Antonio Maldonado³⁻⁴, Abraham Flores², Valentina Flores¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Tarapacá, Departamento de Recursos Ambientales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Arica, Chile
 (3) Universidad de Tarapacá, Núcleo Milenio en Andean Peatlands (AndesPeat), Arica, Chile
 (4) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), La Serena, Chile

Los sedimentos lacustres tienen la capacidad de registrar cambios climáticos ambientales pasados (Anderson et al., 2011). En particular, las lagunas altiplánicas ubicadas a grandes altitudes y expuestas a bajos impactos antropogénicos, tienen el potencial de registrar estos cambios con una alta resolución, tales como las lagunas Miscanti, Negro Francisco, Chungará, entre otras (Valero-Garcés, 1996; Valero-Garcés et al., 1999; Hernández et al., 2008). Sin embargo, no solo son capaces de registrar este tipo de cambios en fenómenos naturales, también tienen el potencial de registrar los efectos de la actividad humana. Estudios realizados en lagunas precordilleras próximos a importantes distritos mineros han detectado concentraciones anómalas de metales pesados, tales como Cu, Mo, As, entre otros, en la parte superior de los sedimentos, lo cual ha sido asociado a la actividad minera de la zona (e.g. Laguna Inca coya; Cerda et al., 2019). También, estudios realizados en lagos altiplánicos, como el Chungará, han detectado concentraciones anómalas de Hg y Cd (Urrutia et al., 2002; Guédron et al., 2019), lo cual ha sido atribuido a contaminación local. Sin embargo, no se descarta que una parte importante de estas concentraciones tenga una fuente geogénica, ya que no hay gran actividad industrial en la zona. A partir de la hipótesis de que los sedimentos de lagunas altiplánicas pueden registrar variaciones climáticas pasadas y también pueden trazar el impacto de procesos antrópicos asociados a una creciente industrialización, se propone como objetivo principal de esta investigación, reconstruir la evolución climática/ambiental del Altiplano durante el Holoceno a partir del registro sedimentario de las lagunas Casiri Macho y Casiri Hembra (18°4'S latitud, 69°5'O longitud y 4.800 m.s.n.m.) localizadas en el altiplano de la región de Arica y Parinacota. También, se espera poder dilucidar si los sedimentos de estas lagunas son capaces de registrar alguna firma antropogénica vinculada con la creciente industrialización del área. Para cumplir este objetivo se utilizaron dos testigos sedimentarios extraídos de las lagunas Casiri Macho y Casiri Hembra, los cuales tienen una profundidad de 125 y 93 cm, respectivamente. La metodología para desarrollar este estudio consiste en la realización de batimetría de las dos lagunas, obtención de dos testigos (uno de cada laguna) en la zona de mayor profundidad, obtención de radiografías de los testigos, descripción macroscópica, análisis de LOI, granulometría láser, propiedades magnéticas y datación a través de C14. Casiri Hembra presenta una profundidad de 30 metros aproximadamente, mientras que Casiri Macho es algo más profunda, alcanzando los 40 metros en las zonas más profundas. A partir de observaciones macroscópicas y apoyado en las imágenes de rayos X podemos observar una alternancia de capas bien definidas, lo cual puede ser asociado a cambios en los procesos involucrados en la sedimentación, desde cambio en los agentes transportadores principales a cambios en tasas de sedimentación. Las edades obtenidas hasta el momento en la base de los testigos nos proporcionan en Casiri Hembra una edad de 811 +/- 22 años AP y en Casiri Macho de 3.022 +/- 22 años AP (ambas edades sin calibrar), obteniendo tasas de sedimentación anuales de 1,14 mm/año y 0,41 mm/año, respectivamente. Los resultados provenientes de los análisis granulométricos, LOI y propiedades magnéticas nos permitirá corroborar el uso de sedimentos de lagunas altiplánicas como un trazador de cambios climáticos ambientales pasados y comprender el rol de ciertos procesos geológicos en la formación de estas lagunas. Además, la integración de estos datos puede ser de gran ayuda para la gestión y conservación de estos ecosistemas sensibles a modificaciones intensas.

Palabras Clave: Sedimentos lacustres, Cambio climático y ambiental, Lagunas altiplánicas, Contaminación antrópica, Reconstrucción Holocénica.

Financiamiento: Fondecyt Regular No 1200423 "Holocene climatic variations and environmental conditions promoting high metals concentrations in Atacama Desert and Altiplano: a bio-geo-chemical approach on lacustrine sediments", Investigadora Principal Dra. Adriana Aránguiz.

Agradecimientos: A FONDECYT N°1200423; Núcleo Milenio AndesPeat, FONDECYT Postdoctorado N° 3210291

Referencias:

- Anderson, D.G., Maasch, K., Sandweiss, D.H. (2011). Climate Change and Cultural Dynamics: A Global Perspective on Mid-holocene Transitions. Elsevier Science.
- Cerda, M., Evangelista, H., Valdés, J., Siffedine, A., Boucher, H., Nogueira, J., ... & Ortlieb, L. (2019). A new 20th century lake sedimentary record from the Atacama Desert/Chile reveals persistent PDO (Pacific Decadal Oscillation) impact. Journal of South American Earth Sciences, 95, 102302.
- Guédron, S., Tolu, J., Brisset, E., Sabatier, P., Perrot, V., Bouchet, S., ... & Baker, P. A. (2019). Late Holocene volcanic and anthropogenic mercury deposition in the western Central Andes (Lake Chungará, Chile). Science of The Total Environment, 662, 903-914.
- Hernandez, A., Bao, R., Giralt, S., Leng, M. J., Barker, P. A., Saez, A., ... & Sloane, H. J. (2008). The palaeohydrological evolution of Lago Chungará (Andean Altiplano, northern Chile) during the Lateglacial and early Holocene using oxygen isotopes in diatom silica. Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association, 23(4), 351-363.
- Urrutia, R., Yevenes, M., & Barra, R. (2002). Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: Lagos Chungará, Laja y Castor. Boletín de la Sociedad Chilena de Química, 47(4), 457-467.
- Valero-Garcés, B. L., Grosjean, M., Schwalb, A., Geyh, M., Messerli, B., & Kelts, K. (1996). Limnogeology of Laguna Miscanti: evidence for mid to late Holocene moisture changes in the Atacama Altiplano (Northern Chile). Journal of Paleolimnology, 16, 1-21.
- Valero-Garcés, B. L., Grosjean, M., Kelts, K., Schreier, H., & Messerli, B. (1999). Holocene lacustrine deposition in the Atacama Altiplano: facies models, climate, and tectonic forcing. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 151(1-3), 101-125.

Revisión taxonómica y nuevos hallazgos de flora fósil del Triásico tardío de la formación de La Ternera, Región de Atacama, Chile

Javier Contreras Castillo¹, Philippe Moisan Tapia²

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Atacama, Departamento de Química y Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

La Formación La Ternera es una unidad volcano-sedimentaria que data del Triásico Tardío, que aflora en distintas localidades en la provincia de Copiapó en el norte de Chile. Esta unidad presenta dos miembros: un miembro superior volcánico y un miembro inferior volcano-sedimentario, formado por areniscas arcóscas, areniscas cuarcíferas, conglomerados, lutitas pardas y grises, con intercalaciones de carbón antracitoso y niveles portadores de abundante flora fósil. Los registros paleobotánicos provienen principalmente de las quebradas El Carbón y La Cachivarita e incluyen troncos petrificados en posición de crecimiento, improntas vegetales y evidencias de marcas de oviposición en plantas fósiles. La presente revisión taxonómica de la flora fósil de la Fm. La Ternera, se basa en las colecciones históricas recolectadas por Rafael Herbst, Alejandro Troncoso y colaboradores y, además de abundante material recientemente recolectado. Este estudio busca profundizar en el conocimiento paleobotánico de Atacama, mediante análisis cualitativo y cuantitativo de los taxones presentes en ambas localidades de la Formación La Ternera. La asociación paleoflorística está representada por grupos vegetales característicos del Triásico gondwánico: pteridofitas, equisetales, pteridospermas, ginkgoales, cicadófitas, y coníferas. Algunas de estas plantas muestran evidencias de interacciones planta-insecto, como, por ejemplo, marcas de alimentación foliar, agallas y ovoposición. Adicionalmente se da a conocer el primer registro de macrofósiles de licófitas para el Triásico de Chile, que permite aumentar la diversidad vegetal para el Triásico de Chile. El análisis de la biodiversidad de la taoflora presente en Fm. La Ternera, así como las interacciones planta-insecto y los recientes nuevos hallazgos realizados permiten mejorar el entendimiento sobre los ecosistemas terrestres del Triásico Tardío en el norte de Chile, a la vez que fomentan la realización de futuras investigaciones en una de las localidades paleobotánicas del Triásico más ricas y diversas del Gondwana.

Palabras Clave: Triásico, Gondwana, Paleobotánica, Mesozoico, Paleoentomología.

Referencias:

- Cariglino, Barbara & Moisan, Philippe & Lara, María Belén. (2021). The fossil record of plant-insect interactions and associated entomofaunas in Permian and Triassic floras from southwestern Gondwana: A review and future prospects. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Gnaedinger, Silvia & Herbst, R. (2001). Triassic Pteridosperms from the Norte Chico of Chile. *Ameghiniana*. 38. 281-298.
- Gnaedinger, Silvia & Herbst, R. (2004). Pteridophylla Triásicas del Norte de Chile. *Revista Del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. 6. 49-59.
- Gnaedinger, Silvia & Rodrigues, Karen & Gallego, Oscar. (2014). Endophytic oviposition on leaves from the Late Triassic of northern Chile: Ichnotaxonomic, palaeobiogeographic and palaeoenvironment considerations. *Geobios*. 47.
- Herbst, R. & Melchor, Ricardo & Troncoso, A. (1998). The Pteridophyta and the paleoenvironment of the middle part of the La Ternera Formation (Upper Triassic) at Quebrada La Cachivarita, Atacama Region, Chile. *Revista Geológica de Chile*. 25. 85-107.
- Sepúlveda, P. & Naranjo, J.A. (1982). Geología de la Hoja Carrera Pinto. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No.53, 620.
- Troncoso, Alejandro & Herbst, Rafael. (1999). Ginkgoales del Triásico del norte de Chile. *Revista Geológica De Chile - REV GEOL CHILE*. 26.

Análisis de facies de las unidades volcánicas y sedimentarias Oligo-Miocenas en el Cordón Cerro Las Vizcachas (35°45' - 35°50'S), Región del Maule, Chile

Camila Díaz Bórquez¹, Juan Pablo Contreras Figueroa², Reinaldo Charrier González¹⁻³, Diego Montecino²

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Geología Regional, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile

(3) Universidad Andres Bello, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

El periodo de deformación extensional que ocurrió durante el Oligo-Mioceno permitió el desarrollo de depocentros extensionales a largo de la Cordillera Principal entre los 29°S y 44°S, específicamente cuencas de intraarco, y algunas cuencas de trasarco. Cerca de los 36°S, durante este período se depositaron rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, las cuales son asignadas a la Formación Colbún. Estas rocas son correlacionables hacia el norte, entre los 32°S y 35°S con la Formación Abanico y hacia el sur con la Formación Cura-Mallín.

Al sur del Embalse Colbún, en el Cordón Cerro Las Vizcachas, aflora la Unidad Superior, compuesta de rocas piroclásticas, y la porción volcano-sedimentaria de la Unidad Inferior (VS y VCI de Vergara *et al.*, 1999). El objetivo de este estudio es comprender la evolución de los ambientes geológicos que dieron origen a estas sucesiones volcánicas y sedimentarias, y con ello, determinar su posible correlación con otras formaciones de la Cordillera Principal de Chile Central. Para esto se presentan resultados de un análisis de facies y algunas edades U/Pb en circones para establecer esas correlaciones.

Las sucesiones volcanoclásticas de la Formación Colbún se encuentran suavemente deformadas desde la base hacia el techo, formando un sinclinal de eje N-S y una longitud de onda de varios metros de ancho. Las rocas del área estudiada son parte del flanco oriental de este pliegue, presentan un rumbo NNE y un carácter homoclinal con manteos al oeste que varían progresivamente, siendo más inclinados hacia la base, llegando a ser subhorizontales en la sección superior. A partir del levantamiento estratigráfico se obtuvo una columna integrada de 500 m de espesor (Columna Fm. Colbún, Figura 1), donde la sección basal está compuesta de una alternancia de niveles piroclásticos y sedimentarios con manteos entre 38°-50°, la sección intermedia contiene mayoritariamente niveles sedimentarios hacia la base y niveles piroclásticos hacia el techo, con manteos entre 30°-40°, y la sección superior corresponde principalmente a sucesiones piroclásticas, las que se tienen un manteo de entre 10° - 20°.

En esta columna se reconocen 24 litofacies, de ellas 13 son sedimentarias, dentro de las cuales predominan litofacies gruesas de conglomerados y areniscas, y las 11 litofacies restantes son piroclásticas, dentro de las que se tienen, tanto litofacies macizas como estratificadas o difusamente estratificadas, algunas de estas con abundante contenido de flora fósil. En cuanto a la asociación de facies, se identificaron un total de 10 asociaciones de facies. Las asociaciones de facies sedimentarias corresponden a flujos en manto, flujos de detritos, flujos canalizados y lagos efímeros, mientras que las asociaciones de facies piroclásticas corresponden en su mayoría a depósitos de corrientes de densidad piroclástica con subordinados depósitos de caída piroclástica, y, en menor cantidad, depósitos asociados a decantación de piroclastos en lagos efímeros.

Las asociaciones de facies permiten reconocer un claro ambiente continental volcánico, donde, a partir de las facies sedimentarias, se pueden reconocer 3 ambientes deposicionales importantes: aluvial, fluvial, que son los ambientes dominantes, y lacustre, que se presenta de forma subordinada. El ambiente aluvial presenta variaciones a lo largo de la columna, hacia la base existe una mayor abundancia de facies de flujos en manto (A1 y A2), mientras que hacia el techo existe una mayor presencia de facies de flujos de detritos con mayor porcentaje de matriz (A4) y facies de flujos de detrito tipo lahárico (A6) (Figura 1). El ambiente fluvial está representado por las litofacies con estratificación paralela o cruzada, en algunas ocasiones con bases acanaladas, que se interpretan como flujos canalizados y depósitos de barras longitudinales y transversales dentro de un sistema de ríos trenzados (A3). El ambiente lacustre está representado por las litofacies más finas, que poseen mayoritariamente laminación paralela y litofacies calcáreas con ondulitas y laminación paralela (A5), estas se interpretan como lagos efímeros dentro del sistema aluvio-fluvial, estas facies también se han reconocido en la zona de Quinamávida, donde afloran rocas volcanoclásticas con abundante flora fósil y niveles de carbón de espesores centimétricos (Bascuñán, 2005).

Esta coexistencia de ambientes sedimentarios intercalados entre ambientes predominantemente volcánicos se puede interpretar como el desarrollo de diferentes facies dentro de un abanico volcanoclástico. Específicamente, a lo largo de la columna de Formación Colbún se reconocen facies correspondientes a ambientes distales, intermedios y proximales. Las facies distales están representadas por depósitos con un mínimo o nulo aporte de material piroclástico y un impacto eruptivo indirecto en relación con la sedimentación, por lo que dentro de la columna se asocian a los depósitos fluviales bien desarrollados y a los depósitos lacustres. Las facies intermedias representan la depositación, tanto de material volcánico como sedimentario; hacia la base de la columna se asocian con la sucesión de depósitos de flujos de detritos y/o hiperconcentrados con rocas piroclásticas, mientras que hacia el techo se las asocia con rocas piroclásticas bien estratificadas. Las facies proximales representan sectores cercanos al edificio volcánico, por lo que incluyen, tanto lavas como depósitos piroclásticos de granulometrías gruesas, situación que en la columna se observa solo hacia el techo, donde existen espesores decimétricos de tobas de lapilli.

En las cuencas sedimentarias influenciadas tanto por volcanismo como por tectonismo activo, es importante distinguir entre la sedimentación inducida por volcanismo y la sedimentación inducida por subsidencia, es por ello que es necesario separar los períodos sineruptivos, que son caracterizados por una alta carga sedimentaria resultante de procesos asociados a flujos de detritos y de inundación, de los inter-eruptivos, donde la carga sedimentaria es considerablemente disminuida, lo que lleva a que se produzca incisión en los depósitos sineruptivos. En base a esto, la evolución deposicional de los depósitos volcanoclásticos y volcanosedimentarios de la Formación Colbún, se pueden separar en tres etapas sineruptivas y dos etapas inter-eruptivas.

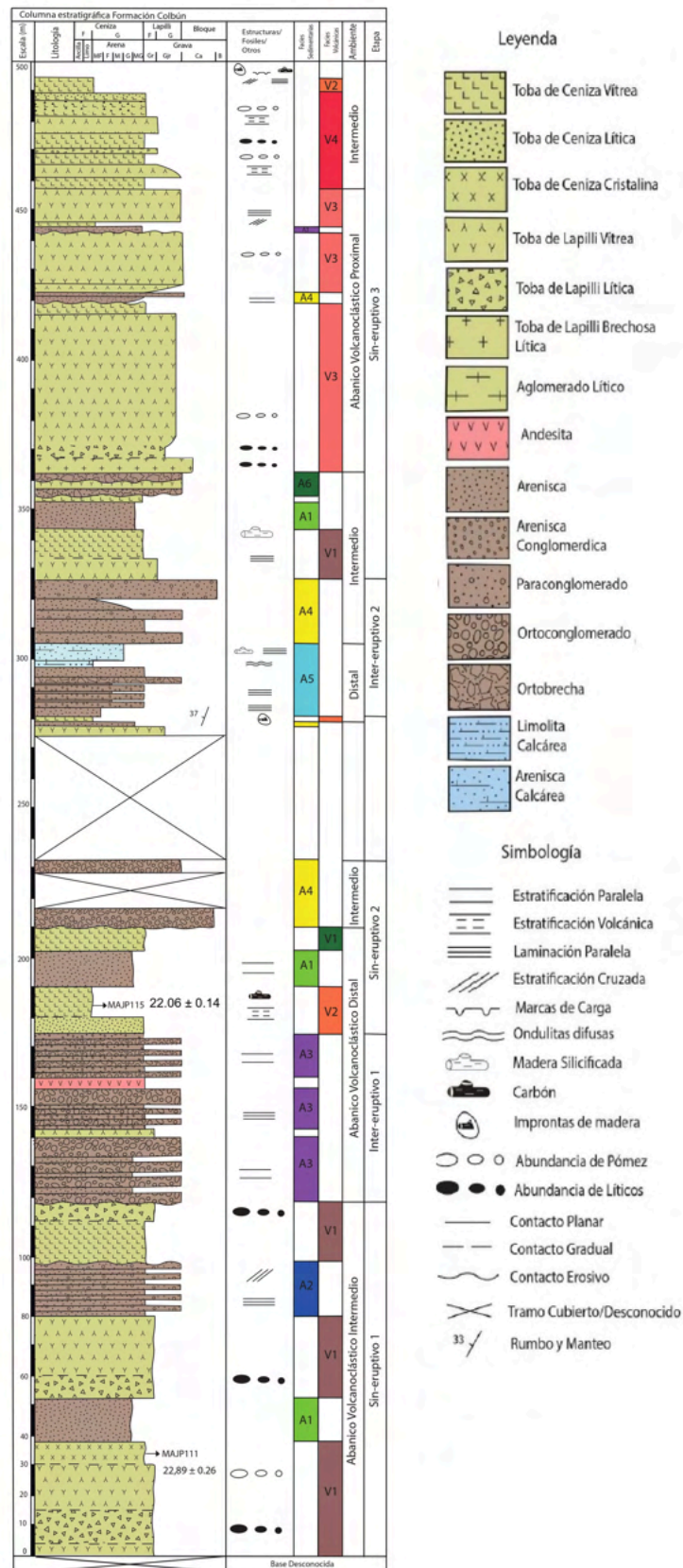


Figura 1: Columna estratigráfica de las rocas de la Formación Colbún que afloran en el Cordón Cerro Las Vizcachas, Región del Maule. En ella se representan las rocas volcanosedimentarias de la Unidad Inferior y las rocas piroclásticas de la Unidad Superior según Vergara et. al. (1999). Las asociaciones de facies sedimentarias se encuentran representadas con los códigos A1, A2, A3, A4, A5 y A6, mientras que las asociaciones de facies piroclásticas están representadas con los códigos V1, V2, V3 y V4. En el texto se refieren a las interpretaciones de ambiente y etapas eruptivas.

Es importante destacar que a lo largo del registro estratigráfico no se observan mayores interrupciones asociadas a la historia deposicional y tampoco se observa algún tipo de discordancia regional. Más bien lo que se observa son contactos erosivos, asociados a la erosión causada por procesos deposicionales, siendo el de mayor importancia el que marca la transición entre el ambiente de abanico volcanoclástico intermedio al abanico proximal.

Sumado a esto, en base a las dataciones radiométricas U/Pb que se realizaron (MAJP115 y MAJP111 en Figura 1) se puede observar que el rango de edad para la depositación de estas rocas es bastante acotado, por lo que estas evidencias sugieren que la sedimentación y depositación de los 500 metros de espesor se generaron a lo largo de un periodo continuo, durante un rango de tiempo menor a 1 Ma.

A lo largo de la columna se pueden observar patrones progradacionales, variando desde facies distales a proximales, esto representa que el suministro de sedimentos hacia la cuenca es mayor que el espacio de acomodación existente en ella, lo cual se puede fundamentar muy bien durante las etapas sineruptivas donde efectivamente debiese existir una alta carga sedimentaria y volcánica generada por actividad volcánica explosiva y representada por los potentes estratos de tobas y lapilli alternados con areniscas y conglomerados. Por otro lado, en las etapas inter-eruptivas, se pueden inferir de mejor manera la influencia de la subsidencia y la tectónica en la sedimentación, en estas sucesiones se presentan patrones agradacionales, que se pueden interpretar como consecuencia de una alta tasa de subsidencia donde se crean espacios de acomodación de forma constante (Viseras et. al., 2003), y también se observan patrones progradacionales, los que se pueden interpretar como la consecuencia de una baja tasa de subsidencia tectónica (Viseras et. al., 2003).

En relación con lo descrito anteriormente, los patrones deposicionales de las etapas sineruptivas e inter-eruptivas permiten inferir que la sedimentación fue generada por una interacción entre el volcanismo y la subsidencia tectónica, y que el espacio de acomodación generado durante la sedimentación en la cuenca Colbún se debió a tasas de subsidencia relativamente altas. Esto implica que los principales mecanismos de subsidencia en la cuenca fueron, tanto por la carga volcánica y sedimentaria, como por el adelgazamiento cortical que se habría estado generando durante un régimen tectónico extensional.

Las dataciones radiométricas realizadas en la Formación Colbún, en conjunto con aquellas recopiladas de la bibliografía existente, permiten acotar la edad de depositación de estas rocas, asignándoles una edad Oligoceno – Mioceno temprano. Las evidencias sedimentológicas presentadas previamente, junto con las evidencias geoquímicas conocidas, las que muestran firmas toleíticas y de arco volcánico en las rocas volcánicas de la base de la Formación Colbún (Vergara et al., 1999; Díaz-Neicun, 2021), permiten interpretar condiciones de depositación asociadas a un régimen tectónico extensional, desarrollado durante una temporalidad similar a los depósitos asociados a la Cuenca de Abanico. Por estas razones, es posible afirmar que las sucesiones volcanoclásticas del Cordón Cerro Las Vizcachas corresponderían a una prolongación de la Cuenca de Abanico hacia el sur, tal como se ha planteado en estudios previos. Sin embargo, esto también demuestra que a lo largo de la Cuenca de Abanico existen varios eventos de extensión que son diacrónicos en el tiempo y que dependen de la latitud, siendo más antiguos hacia el norte y aparentemente más jóvenes hacia el sur, esto coincide con lo postulado por Fennell y otros (2019), quienes postulan que el régimen extensional al sur de los 35°S habría tenido su mayor expresión entre los 25-20 Ma. De todas maneras, es necesario estudiar en más detalle la relación y transición entre la Formación Colbún y sus correlaciones hacia el norte (Formación Abanico) y hacia el sur (Formación Cura-Mallín), ya que este parece ser un punto clave para comprender la distribución de las cuencas extensionales que se generaron durante el Cenozoico a lo largo del Centro-Sur de Chile.

Palabras Clave: Formación Colbún, Estratigrafía de rocas volcanoclásticas, Volcanismo Cenozoico, Cuencas de intraarco.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el Servicio Nacional de Geología y Minería.

Agradecimientos: Al Parque Vizcachas de Rari por permitirnos el acceso a realizar este trabajo en sus dependencias.

Referencias:

- Bascuñán, S. (2005). Geología y Mineralogía de las tobas de Quinamávida, Colbún, VII Región, Chile (Tesis de Pregrado). Universidad de Concepción.
- Díaz-Neicun, J. (2021). Petrogénesis ígnea de la Formación Colbún en la precordillera de Linares (~36°S) durante el Oligo-Mioceno (Tesis de Pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Fennell, L., Iannelli, S., Encinas, A., Naipauer, M., Valencia, V. and Folguera, A. (2019). Alternating contraction and extension in the Southern Central Andes (35°–37°S). *American Journal of Science*, 319(5), pp.381-429.
- Vergara, M., Morata, D., Hickey-Vargas, R., Lopez-Escobar, L., y Beccar, I. (1999). Cenozoic tholeiitic volcanism in the Colbún area, Linares Precordillera, central Chile (35°35'-36°S). *Revista geológica de Chile*, vol. 26(1), p. 23-41.
- Viseras, C., Calvache, M., Soria, J. and Fernández, J. (2003). Differential features of alluvial fans controlled by tectonic or eustatic accommodation space. Examples from the Betic Cordillera, Spain. *Geomorphology*, 50(1-3), pp.181-202.

Huellas tetradáctilas y restos vegetales de las formaciones Majala y Chacarilla del límite Jurásico Superior-Cretácico Inferior, en Proyecto Quebrada Blanca Fase 2, Región de Tarapacá, Norte de Chile

Karina Silva Salinas¹, Karen Moreno Fuentealba¹⁻², **Oscar Finsterbusch Lagos¹**, Linda Vidal Murillo¹, Ari Iglesias³, Giselle Astorga Astorga², Rodrigo Orrego Castro¹

(1) Gestiona Consultores SpA, Francisco Noguera 200, Providencia, Santiago, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(3) Universidad Nacional de Comahue, Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente INBIOMA-CONICET, Quintral 1250, San Carlos de Bariloche, Argentina

Las formaciones Majala y Chacarilla representan la transición entre el Jurásico y el Cretácico en la región de Tarapacá, en el Norte de Chile; de donde se conocen reportes de icnitas atribuibles a dinosaurios y cocodrilos. La mayoría corresponden a improntas tridáctilas de terópodos, ornitópodos y tireóforos de tamaños variables (10-75 cm de largo); y otras tetradáctilas, escasamente documentadas, asignadas a crocodilia (10 cm de largo). Los registros vegetales en estas unidades corresponden a trazas de raíces y moldes de troncos en las mismas capas portadoras de icnitas.

En el presente trabajo se informa el hallazgo de icnitas tetradáctilas (10 cm de largo del autopodio, 17 cm total con impresión del zeugopodio), simetría paraxónica, bípedas, componiendo una pista de 3 huellas en distintos grados de penetrabilidad del sustrato, de las cuales 2 son las mejor preservadas en términos de morfología pedal (H1, H6). Estas se encontraron en el marco del Proyecto Quebrada Blanca Fase 2 (QB2) de Compañía Minera Teck Quebrada Blanca S.A., en capas transicionales entre ambas unidades estratigráficas, a 8 km al sureste de Guatacondo.

Se analizaron las características morfológicas de la asociación de la pista y se contrastaron con la morfología pedal de varios potenciales productores (dinosaurios, cocodrilos, quelónidos, pterosaurios y lacértidos). En base al tamaño, forma, bipedialismo y tetradactilia funcional, se consideró inicialmente como el productor más probable, al dinosaurio *Chilesaurus diegosuarezi*. Análisis preliminares cinemáticos del pie de *C. diegosuarezi* modelado virtualmente, descartan al dinosaurio como productor, pero permiten inferir el proceso de formación de icnitas en diferentes consistencias del sustrato.

El análisis de la columna estratigráfica revela una asociación de facies silicoclásticas, conformadas por la intercalación de fangolitas con arenitas y wackas de grano fino, con ondulitas, laminación cruzada y horizontal, evidenciando condiciones intermitentes de moderada a baja energía de sedimentación.

Entre el material vegetal asociado al nivel de icnitas, se identificaron diversos órganos de la familia Cheirolepidiaceae. Se reconocieron polen de *Classopollis*, hojas y ramas de tipo *Frenelopsis*, conos de tipo *Classostrobus*, escamas ovulíferas y fragmentos de leño de *Cupressinoxylon*. La monodominancia de Cheirolepidiaceae entre los restos vegetales permite inferir características muy particulares en el ambiente en que vivieron las plantas, destacándose condiciones halófitas, helofíticas y/o temporalmente áridas. Las líneas de evidencia presentadas permitirían interpretar el ambiente de deposición como una planicie litoral-deltaica de tipo árida, temporalmente cubierta con una capa de agua efímera asociada a una vegetación leñosa achaparrada.

Palabras Clave: icnitas tetradáctilas, dinosaurio, *Chilesaurus*, Cheirolepidiaceae, paleobotánica

Financiamiento: Compañía Minera Teck Quebrada Blanca S.A.

Agradecimientos: Compañía Minera Teck Quebrada Blanca S.A.; equipo GeoSalazar por la toma inicial de datos y Gestiona Consultores SpA, UACH y UST, por permitir el uso de sus laboratorios para los diferentes análisis.

Flora triásica dominada por *Dicroidium* de los Estratos El Mono, Región de Atacama, Chile

Marcelo Flores Alfaro¹, Philippe Moisan Tapia², Diego Volosky Medina³

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Atacama, Departamento de Química y Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Copiapó, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

Los Estratos El Mono afloran ampliamente en la precordillera de la Región de Atacama, al este de la ciudad de Copiapó. Esta unidad informal ha sido definida como una secuencia de sedimentos clásticos de hasta 2000 m de espesor. De base a techo, la unidad está conformada por tres miembros, que corresponden a: conglomerados gruesos y areniscas ricas en cuarzo (TrJem1), lutitas negras (TrJem2) y areniscas ricas en cuarzo y conglomerados de grano fino (TrJem3). El contenido fósil, reportado en estudios previos, corresponde a fragmentos de plantas, palinomorfos, conchostracos, ostrácodos, bivalvos de concha gruesa (*Diplodon sp.*) y dientes de tiburones hybodóntidos. Estudios taxonómicos sólo han sido realizados para los conchostracos.

En este trabajo se presenta, por primera vez, evidencia acerca de la asociación paleoflorística presente en los Estratos El Mono, a partir de material recolectado en tres localidades: Mina La Coipa, Quebrada La Pelada y Quebrada del Peñón. De especial interés son los afloramientos en la Mina La Coipa situados a aprox. 4200 msnm, en la cual debido a la intensa actividad minera han quedado expuestos excelentes afloramientos. El material recolectado muestra una flora dominada por *Dicroidium*, un género de helechos con semilla característico de las comunidades vegetales del Triásico Medio a Tardío de Gondwana. El resto de la flora está compuesta por helechos, equisetales, helechos con semilla, cicadófitas, coníferas y estructuras reproductivas. Algunas de estas plantas evidencian marcas de herbivoría. Los restos vegetales se encuentran asociados a conchostracos, bivalvos de agua dulce, insectos, ostrácodos y peces óseos.

Sedimentológicamente, las localidades estudiadas se encuentran representadas principalmente por (1) facies de lutitas negras con laminación paralela muy fina, (2) facies de areniscas de grano fino masivas, (3) facies de areniscas conglomerádicas, (4) facies de areniscas masivas de grano medio a grueso, (5) facies de limolitas masivas, (6) facies de limolitas con laminación cruzada y (7) facies de conglomerados matriz soportados, con clastos de tamaño grava fina a media. Preliminarmente, los caracteres sedimentológicos, florísticos y faunales muestran características típicas de un ambiente fluvio-lacustre.

De acuerdo con los nuevos antecedentes paleoflorísticos, se propone una edad Triásico Medio a Tardío para los Estratos El Mono; en contraste a la edad Triásico Temprano asignada anteriormente. Estudios posteriores detallados sobre la rica y diversa flora y fauna recientemente recolectada en Los Estratos El Mono permitirán definirla como una *Lagerstätte* fósil y, a su vez, en la biota triásica más completa de Chile.

Palabras Clave: Estratos El Mono, Triásico, Paleobotánica, *Dicroidium*.

Financiamiento: Proyectos DIUDA 22411 y FIC 40013408-0.

Agradecimientos: (1) Proyectos DIUDA 22411 y FIC 40013408-0. (2) Empresa Kinross Chile, faena La Coipa.

Acumulación de loess y desarrollo de suelos en Patagonia suroccidental (51°S): implicancias para la reconstrucción de los vientos del oeste y cambios superficiales durante el Holoceno

Valentina Flores-Aqueveque¹, Brent Alloway², Carolina Gómez-Fontalba¹, Tania Villaseñor³, Patricio I. Moreno⁴, Stephane Alfaro⁵, Héctor Pizarro¹, Lucía Guerra⁶

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Las Encinas 3371, Santiago, Chile

(5) Université de Paris Est Créteil and Université de Paris, 61 Av. du Général de Gaulle, 94000 Créteil, Francia

(6) Universidad Nacional de Córdoba, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina

Los vientos del oeste (SWW) del Hemisferio Sur juegan un rol fundamental en la circulación oceánica y el clima global. En Patagonia, estos vientos controlan las altas tasas de precipitación (1000–7000 mm yr⁻¹) sobre el lado occidental de los Andes, siendo éstas muy sensibles a cualquier cambio -latitudinal o de intensidad- de este cinturón de viento.

El comportamiento actual de los SWW es relativamente conocido; estos vientos presentan núcleo centrado alrededor de 51°S y una marcada estacionalidad. Sin embargo, su comportamiento en el pasado no está totalmente comprendido y existe aún mucha incertidumbre sobre la temporalidad y la magnitud de sus cambios, particularmente, durante el Holoceno.

Hasta el momento, todas las reconstrucciones de los SWW en Patagonia han sido realizadas a partir de indicadores paleoclimáticos indirectos, como cambios en la erosión por escorrentía relacionada a precipitación (por ejemplo, a partir de la intensidad de Fe en sedimentos de fiordo y marinos) y variaciones en los patrones de vegetación (es decir, polen en sedimentos lacustres).

Por el contrario, los depósitos eólicos se consideran un proxy paleoclimático que registra directamente la circulación atmosférica superficial en el pasado. En particular, las secuencias terrestres de loess-paleosuelos (LPS) corresponden a registros detallados de la evolución del paleoclima a gran escala. Las características sedimentológicas, pedológicas y geoquímicas, entre otras, del LPS han sido ampliamente estudiadas tanto en China como en Europa y Norteamérica. Sin embargo, la interpretación de estos proxies a menudo sólo considera los procesos de transporte eólico. Para evitar una interpretación simplista de la importancia paleoambiental del LPS, se debe considerar además la disponibilidad, el transporte, la deposición y los procesos de modificación posteriores.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una reconstrucción de alta resolución (centenal a decadal) de la variabilidad de la intensidad de los SWW durante el Holoceno, basada en el estudio de una secuencia de loess-paleosuelo de Patagonia suroccidental (51°S). La metodología incluyó análisis de: tamaño de grano, pérdida por ignición, micromorfología superficial de granos, susceptibilidad magnética, petrografía y conteo modal en arenas, y dataciones por radiocarbono de la secuencia LPS-TdP. Estos datos se complementaron con un estudio de la variabilidad geomorfológica reciente en el área de estudio.

Nuestros resultados indican que durante el Holoceno, no se registraron variaciones en la zona de aporte de sedimentos, por lo que es posible asociar directamente cambios en la deposición de sedimentos a variaciones de tamaño de grano, lo que se ha utilizado ampliamente como un indicador directo de la intensidad del viento. Estos resultados sugieren importantes variaciones de intensidad de los SWW de escala multicentenal a multidecadal.

Finalmente, comparamos nuestros resultados con otras reconstrucciones indirectas de la variabilidad de los SWW a fin de evaluar su sensibilidad para registrar cambios en la intensidad de los vientos del oeste a lo largo del tiempo. Los resultados de esta reconstrucción contribuirán a reconciliar las interpretaciones conflictivas de los SWW basadas en indicadores indirectos de la intensidad de los vientos del oeste en la Patagonia.

Palabras Clave: Loess, Patagonia, Vientos del oeste, Reconstrucciones paleoclimáticas, Paleosuelos.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado con el Proyecto Fondecyt 1191942 (IR: V. Flores).

Agradecimientos: V. F.-A., T.V., C. G.-F., P.I.M y S.A. agradecen al Proyecto Fondecyt 1191942.

Estudio preliminar sobre evidencias de interacciones planta-insecto en el Triásico de Chile

Vicente Garrido Castillo¹, Philippe Moisan Tapia²

(1) Universidad Andrés Bello, Departamento de geología, Facultad de ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad de Atacama, Departamento de Química y Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Copayapu 485, Copiapó, Chile

Este estudio trata sobre un análisis cualitativo de las interacciones planta-insecto reconocidas en plantas fósiles de diferentes localidades Triásicas de Chile. El material estudiado corresponde a impresiones foliares depositadas en la Colección de Paleobotánica depositada en el Museo Nacional de Historia Natural de Santiago.

El reconocimiento de estas interacciones se realizó basándose en la metodología de identificación de Labandeira (2007), donde se describen en detalle distintos morfotipos de daños foliares reconocibles y repetibles en el registro fósil catalogados como DTs. A cada uno de estos se le asigna un grupo de alimentación funcional (FFG), tal como alimentación foliar externa, perforación y succión, minaduras, agallas, oviposiciones, entre otras. Casi todas estas están relacionadas con artrópodos terrestres como su grupo de alimentación funcional, siendo la gran mayoría de los daños producidos por insectos, pero existen también generados por pequeños arácnidos o hasta por hongos.

La mayor parte del material revisado pertenece a la Formación La Ternera, específicamente recolectado en las Quebrada La Cachivarita y Quebrada El Carbón, pero también se ha estudiado material proveniente de las formaciones Santa Juana, Tralcán, Las Breas, Panguipulli, entre otras formaciones en las que se han encontrado numerosas interacciones invertebrado-planta. Principalmente se tratan de muestras de oviposiciones en especímenes de coníferas, marcas de minadura, alimentación foliar, y de perforación y succión en pteridofitas.

Las unidades geológicas en las que se han encontrado dichas interacciones han sido datadas entre el Triásico Medio al Tardío, lo que es sincrónico con el tercer evento de expansión de la herbivoría definido por Labandeira (2006). Esta se define, principalmente, por interacciones encontradas en Europa, Sudáfrica, y Estados Unidos, existiendo muy poca información publicada para Gondwana. A pesar de que Sudamérica posee un abundante número de depósitos Pérmico-Triásicos en los que se han realizado detallados estudios taxonómicos sobre sus floras, las investigaciones de interacciones bióticas siguen siendo muy escasas (Cariglino *et al.*, 2021) por lo que este estudio busca entregar nuevos antecedentes para mejorar el entendimiento de la evolución en las interacciones planta-insecto para el margen sur occidental de Gondwana.

Palabras Clave: Triásico, flora de dicroidium, Gondwana, herbivoría, paleoecología.

Referencias:

- Cariglino, B., Moisan, P. & Lara, M.B., 2021. The fossil record of plant-insect interactions and associated entomofaunas in Permian and Triassic floras from southwestern Gondwana: A review and future prospects. *Journal of South American Earth Sciences* 111: 103512
- Labandeira, C.C., 2006. The Four Phases of Plant-Arthropod Associations in Deep Time. *Geologica Acta* 4: 409-438.
- Labandeira, C.C., Wilf, P., Johnson, K.R., and Marsh, F., 2007. Guide to Insect (and Other) Damage Types on Compressed Plant Fossils. Version 3.0. Smithsonian Institution, Washington, D.C. 25 p.

Estratigrafía y ambientes de deposición del Jurásico en la quebrada de Livilcar, Región de Arica y Parinacota

Edwin González Abarca¹, Rodrigo Arcos¹, Edmundo Polanco¹, Sebastián Cabrera²

(1) Servicio nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Unidad de Geología Regional, Avda. Santa María 0104, Santiago, Chile

(2) GeoAtacama Consultores Ltda.

Como parte del trabajo de mapeo geológico elaborado por el Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN en el área de la Carta Codpa, ubicada en la depresión preandina y precordillera de la Región de Arica y Parinacota, se estudiaron las unidades sedimentarias jurásicas del río San José de Azapa, que afloran entre las localidades Santuario de Las Peñas y poblado de Livilcar.

Esta zona fue previamente estudiada en los trabajos de Muñoz *et al.* (1988), García *et al.*, (2004) y BHPB-Aurum (2013); sin embargo, las nuevas determinaciones de edad y una mayor escala de detalle de mapeo han permitido subdividir y redefinir las unidades jurásicas previamente definidas en 3: Riolitas del Santuario, Formación Pubrisa y Formación Livilcar. Estas unidades representan el paso de un ambiente continental-volcánico a un ciclo marino transgresivo y posteriormente regresivo ocurrido entre el Sinemuriano y Kimmeridgiano.

Las Riolitas del Santuario corresponden a una sucesión de rocas volcánicas y clásticas continentales altamente falladas y deformadas con un espesor mínimo de 220 m. Están compuestas principalmente por macizos muy fracturados de riolitas, tobas riolíticas y tobas andesíticas a dacíticas, con edades de cristalización U-Pb en circones de $195,4 \pm 1,3$ y $192,8 \pm 2,1$ Ma, y en menor proporción, intercalaciones de brechas conglomerádicas, areniscas conglomerádicas y areniscas líticas gris verdosas.

La Formación Pubrisa, que cubre en discordancia erosiva a las Riolitas del Santuario y tiene un espesor de 450 a 700 m. Litológicamente, representa una sucesión sedimentaria grano y estrato decreciente, conformada por la alternancia de conglomerados y brechas de guija a guijarro, areniscas conglomerádicas canalizadas y arcosas, que hacia el techo se intercalan con calizas y areniscas calcáreas con estratificación plana, cruzada y ondulítica. En andesitas de la parte basal, presenta edades de cristalización U-Pb en circones de 190,6 Ma y en rocas clásticas de la parte media-alta contiene edades de máxima deposición de 188,7 y 168,5 Ma, lo cual, considerando el contenido fosilífero, permite restringir la edad de la formación al lapso Pliensbachiano-Calloviano (190,6-168,5 Ma).

La Formación Livilcar se enmienda a una sucesión regresiva de estratos de origen marino y transicional, constituida por 2 miembros, ambos previamente parte del miembro superior de la Formación Livilcar *sensu* Muñoz *et al.* (1988): el miembro inferior está conformado por areniscas calcáreas, areniscas y lutitas bituminosas de edad Oxfordiana, y el miembro superior está conformado por calizas, calcilutitas, yeso y areniscas calcáreas de edad Oxfordiano a Kimmeridgiano.

En cuanto a la interpretación de los ambientes sedimentarios, las litofacies de las Riolitas del Santuario representan sedimentación en un ambiente continental de sistemas aluviales y volcánicos explosivos, muy próximos a centros efusivos que se desarrollaron durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior. Las rocas clásticas en la base de la Formación Pubrisa se interpretan como un sistema estuarino relativamente sinuoso, con extensas llanuras intermareales y ocasionales eventos aluviales de flujo de detritos. La presencia de fósiles de bivalvos del Jurásico inferior, como los géneros *Weyla* y *Gervillaria* (Covacevich, 1987), indica la ocurrencia de episodios transgresivos intermitentes en este sistema estuarino durante el Pliensbachiano-Toarciano. Hacia el techo de la sección, se observa un claro patrón transgresivo y una dominancia cada vez mayor de litologías carbonáticas, lo cual indica que hacia el Bajociano-Bathoniano, ocurrió una migración de la línea de costa hacia el interior y se desarrolló un embahiamiento, en donde se desarrollaron ambientes de playa y plataforma carbonática. Siguiendo con la sucesión, las litologías observadas en la Formación Livilcar representan un ambiente de plataforma marina somera desarrollado en el trasarco (Muñoz *et al.*, 1988), en el cual ocurrieron episodios regresivos intermitentes que propiciaron el desarrollo de amplias y planas lagunas y plataformas carbonatadas, a las cuales el acceso restringido a la circulación oceánica convertía en llanuras de marea evaporíticas y salinas durante cada disminución del nivel del mar.

En conclusión, las formaciones geológicas en el área de estudio representan la transición de ambientes continentales, estuarinos, marinos someros y evaporíticos, en un ciclo transgresivo-regresivo de aproximadamente 50 Ma. Estos hallazgos contribuyen al entendimiento de la evolución geológica de la región y su relación con los procesos tectónicos y paleoambientales ocurridos en la cuenca de Arequipa-Tarapacá durante el Jurásico.

Palabras Clave: cuenca Arequipa-Tarapacá, Chile, estratigrafía, Jurásico.

Referencias:

- BHPB-Aurum. 2013. Informe Final: Estudio Geológico-Metalogénico Programa Inti – Bloque 1, Región de Arica y Parinacota. Chile. Escala 1:50.000. Geología: Daniel Sellés; Supervisión: Moyra Gardeweg. Covacevich, V. 1987. Estudio de faunas fósiles jurásico-cretácicas de las quebradas de Azapa y de Tarapacá, Región de Tarapacá. Informe 29 (Inédito), Empresa Nacional del Petróleo (ENAP): 15 p.
- García, M.; Gardeweg, M.; Clavero, J.; Hérial, G. 2004. Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 84: 150 p., 1 mapa escala 1: 250.000. Santiago.
- Muñoz, N.; Elgueta, S.; Harambour, S. 1988. El Sistema Jurásico (Formación Livilcar) en el curso superior de la quebrada Azapa, I Región: Implicancias paleogeográficas. In Congreso Geológico, No. 5, Actas 1: A403-A415. Santiago.

La icnofacies teredolites como marcador de condiciones paleoambientales durante el Cretácico-Paleógeno de la Cuenca de Arauco (Chile central)

Martín Jara Cortés¹, Patricio A. Zambrano¹, Leonardo Pérez-Barría²⁻³

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Autopista Talcahuano, 7100, Concepción, Chile

(2) Museo Regional de Aysén, Kilómetro 3 Camino Coyhaique Alto, Coyhaique, Chile

(3) Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia

Las perforaciones fósiles de *Teredolites* son empleados con frecuencia como indicador de las condiciones paleoambientales en sistemas parálicos con influencia marina, ambientes marinos abiertos y secuencias regresivas-transgresivas. En la Cuenca de Arauco (36°46' a 38°30' S) nuevos registros de restos de troncos con *T. longissimus* y *T. clavatus* permiten evaluar las condiciones paleoambientales de los depósitos en una cuenca con sedimentación principalmente siliciclástica dominada por procesos tectonoestratigráficos y eustáticos que generan una tendencia transgresiva durante el Cretácico Superior. Esta es sucedida por episodios de alternancias de transgresión-regresión durante el Paleógeno. En este estudio, se analizaron muestras provenientes de la Fm. Quiriquina (Maastrichtiano Superior), Fm. Boca Lebu (Eoceno temprano), Fm. Trihueco (Eoceno medio) y Fm. Millongue (Eoceno medio – superior). Los primeros resultados indican que existe una gran variabilidad en la conservación, forma y tamaño de las trazas entre las diversas localidades. Las muestras fueron analizadas en base a criterios morfométricos a partir de mediciones de diámetros y largos aparentes; tafonómicos, mediante la identificación de poblaciones y su densidad en el sustrato y; diagenéticos, conforme a la recristalización de las paredes cálcicas y el relleno de los tubos. Los datos obtenidos permitieron identificar la polaridad o sentido de crecimiento de *T. longissimus* en base a bioglifos, obtener pautas de crecimiento de las diversas poblaciones de *T. Longissimus*, identificar eventos de invasión del material vegetal y estimar velocidades de enterramiento de las muestras en base a la relación porcentual de *Teredolites* y el sustrato leñoso. Nuevos análisis se están llevando a cabo para estimar datos específicos de diagénesis y estimaciones de salinidad. Preliminarmente se concluye para la Formación Quiriquina un ambiente con influencia estuarina con cercanía a manglares, para la Formación Boca Lebu se sugiere un shoreface transgresivo eventos específicos de caída de troncos y para la Formación Millongue un ambiente transgresivo marino de shoreface con un aporte constante de troncos por cercanía a selvas o manglares que además pasan periodos importantes en la columna de agua.

Palabras Clave: Teredolites, Longissimus, Clavatus, Transgresiones, Arauco.

Nuevos antecedentes estratigráficos y paleontológicos de los Depósitos litorales en el sector de Cabo Bascuñán, Freirina, Región de Atacama

Samantha Leiva Mera¹⁻², Sebastián Ortega Verdugo¹⁻², Sebastián Montti¹

(1) Gestión Ambiental S.A., Rosario Norte 100, Las Condes, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

En el norte de Chile, las unidades geológicas ubicadas a lo largo de la línea de costa se conocen como Depósitos Litorales. Estos depósitos abarcan un rango estratigráfico que va desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, están compuestos principalmente por gravas, arenas y coquinas. En general, son afloramiento restringidos, pero en algunos sectores, como la región de Atacama, se extienden varios kilómetros hacia el interior, formando terrazas de abrasión marina (González y Niemeyer, 2005; Welkner, Arévalo y Muñoz, 2006), que presentan una amplia riqueza paleontológica dominada por macrofauna fósil invertebrada.

Ubicados a 5 km del sector de Cabo Bascuñán, comuna de Freirina y enmarcados en un estudio de impacto ambiental, se reporta el hallazgo de nuevos antecedentes estratigráficos y paleontológicos de unidades asignables a los Depósitos Litorales de Pleistoceno - Holoceno, los cuales presentan abundante contenido de macrofauna fósil correspondientes a bivalvos, gastrópodos y en menor medida artrópodos y equinodermos. En este trabajo se exponen los principales hallazgos de macrofauna fósil invertebrada en su contexto estratigráfico y paleoecológico.

Los registros estratigráficos, recopilados desde la realización de cuatro calicatas de prospección paleontológica, indican el desarrollo de sucesiones marinas someras, compuestas por arenas, limos, coquinas y gravas, estas últimas como base de todas las secuencias reportadas. Estas sucesiones representan depósitos formados durante el establecimiento de las terrazas marinas presentes en el área. Hoy en día, los registros estratigráficos se pueden observar en diversos niveles aterrazados que se ubican en distintas posiciones con respecto a la línea de costa. Sumado a esto, el registro estratigráfico, evidencia la variabilidad en las condiciones de sedimentación.

A partir de los estudios taxonómicos, se ha determinado que los hallazgos fósiles más representativos corresponden a gastrópodos y bivalvos, dentro de los que destacan *Concholepas concholepas*, *Acanthina monodon*, *Xanthochorus cassidiformis*, *Protothaca thaca*, *Tegula tridentata*, *Felicioliva peruviana*, *Trochita trochiformis*, *Scurria scurra*, *Eurhomalea rufa*, *Semele solida*, *Ameghinomya antiqua*, *Leukoma thaca*, *Retrotapes exalbidus*, *Gari solida*, *Mulinia edulis* e *Incatella cingulata*, los cuales se estiman que representan ensambles de macrofauna invertebrada típica del ecosistema marino de la corriente de Humboldt, los cuales habitarían en zonas intermareales, en el sustrato rocoso y/o arenoso.

Estudios anteriores efectuados en depósitos marinos aterrazados de edad Pleistoceno (MIS 3), han propuesto que ciclos transgresivos-regresivos encontrados en los paquetes sedimentarios que cubren una plataforma de abrasión del basamento rocoso, pueden ser una característica distintiva y un criterio primario para definir las terrazas formadas por olas (Jara-Muñoz y Melnik, 2014). Bajo este contexto, las sucesiones sedimentarias presentes en el área de estudio, se habrían formado durante periodos de transgresión marina asociados a etapas interestadiales del Pleistoceno - Holoceno (Lajoie, 1986; Quezada et al. 2007), lo que genera condiciones propicias para la colonización de la macrofauna invertebrada fósil en este espacio geográfico.

Futuras investigaciones en esta zona, podrían centrarse en la aplicación de metodologías que utilicen la taxa presente como *proxy* para establecer correlaciones con parámetros climáticos del Cuaternario ya establecidos, buscando apoyar en el entendimiento y evolución de los márgenes costeros del Norte de Chile.

Palabras Clave: Depósitos Litorales, Macrofauna marina, Pleistoceno, Corriente de Humbolt, Norte de Chile.

Agradecimientos: Agradecemos sinceramente a la empresa Latin America Power (LAP) por su valiosa ayuda logística y disposición frente a este estudio.

Referencias:

- González, G., y Niemeyer, H. (2005). Cartas Antofagasta y Punta Tetas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 89(35), 1.
- Jara-Muñoz, J., y Melnick, D. (2015). Unraveling sea-level variations and tectonic uplift in wave-built marine terraces, Santa María Island, Chile. *Quaternary Research*, 83(1), 216-228.
- Lajoie, K. R. (1986). Coastal tectonics. *Active tectonics*, 95-124.
- Quezada, J., Gonzalez, G., Dunai, T., Jensen, A., y Juez-Larre, J. (2010). Pleistocene littoral uplift of northern Chile: 21Ne age of the upper marine terrace of Caldera-Bahía Inglesa area. *Andean Geology*, 34(1), 81-96.
- Welkner, D.; Arévalo, C. y Godoy, E. (2006). Geología del área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°100. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.

Nuevos hallazgos de flora fósil en la Cordillera de la Costa de Atacama (Formación Agua Chica, Triásico Tardío)

Camila Leiva Villegas¹, Philippe Moisan Tapia²

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Atacama, Departamento de Química y Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile

La Formación Agua Chica se ubica en la Cordillera de la Costa de Atacama, en el borde septentrional del Parque Nacional Pan de Azúcar, y aflora en distintas áreas al norte de la Quebrada Pan de Azúcar. Esta formación está constituida por una secuencia volcanoclástica, conformada por conglomerados con clastos andesíticos y dacíticos, cuya matriz es mayoritariamente volcánica, alternados por secuencias clásticas finas, en donde se encontró una diversa flora fósil. Lavas y brechas volcanoclásticas ocurren de manera alterna en el centro de la formación. Dataciones radiométricas (U-Pb) en una toba proveniente de la Formación Agua Chica en la Quebrada Pan de Azúcar, indican una edad 200.7 ± 2.29/-3.32 Ma por lo que la facies continental podría alcanzar el límite Triásico-Jurásico (Espinoza et al. 2015). Los sedimentos en la Quebrada Pan de Azúcar han sido interpretados como depósitos de abanicos aluviales, compuestos principalmente por flujos de detritos no consolidados. Las secuencias clásticas finas, en su mayoría no estratificadas, sugieren depósitos en llanuras aluviales. La influencia volcánica supone la proximidad a un centro de producción volcánica, en donde su material piroclástico puede ser interpretado como depósitos piroclásticos de block and ash (Contreras et al. 2013).

Durante recientes expediciones a la Formación Agua Chica se ha recolectado una diversa flora fósil compuesta de frondas y maderas. Las impresiones vegetales corresponden a helechos como *Dictyophyllum* y *Asterotheca*, cicadófitas como *Taeniopteris*, *Pseudoctenis* y *Pterophyllum* y helechos con semilla (pteridopermas) como *Dicrodium*. Las descripciones de estos géneros se basaron en 129 impresiones foliares, las cuales se encuentran preservadas en areniscas de grano fino. Estos taxones son característicos de las asociaciones vegetales del Triásico Tardío de Gondwana. Las maderas fósiles se encuentran como rodados e in situ en conglomerados y lutitas, los cuales se encuentran silicificados con una preservación moderada. En asociación con esta flora, se encontró un resto de insecto, el cual corresponde al primer registro de artrópodos para esta formación.

El estudio de esta flora fósil permite establecer una correlación bioestratigráfica con otras localidades del norte de Chile y con otras cuencas triásicas de Gondwana y, además, aportar al conocimiento de la evolución vegetal en los ecosistemas continentales en el borde sudoccidental durante la crisis biótica del Triásico-Jurásico.

Palabras Clave: Gondwana, flora fósil, Triásico Tardío, insecto, *Dicrodium*.

Agradecimientos: Proyectos DIUDA 22411 y CONAF.

Referencias:

- Bebiolka, 1999. Eine obertriassische Flora aus der nordchilenischen Küstenkordillere (Agua Chica-Formation, Quebrada Pan de Azúcar)
- Contreras, J.P., Espinoza, M., Jorquera, R., Kraus, S., Ramírez, C., De la Cruz, R., Naranjo J.A., Escribano, J., Martínez, O., 2013. Carta Cifuncho, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 161, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Espinoza M., Oliveros, V., Vásquez, P., Bechis, F., 2015. U-Pb geochronology and kinematic preliminary analyses of Late Triassic-Early Jurassic basins in northern Chile (24.5°-26°S). XIV Congreso Geológico Chileno.
- Mercado, M., 1980. Geología del área de Pan de Azúcar, Región de Atacama, Inst. Invest. Geol., Carta Geológica de Chile, No. 37, 20 p.
- Suárez, M., Naranjo, J. A., Puig, A., 1985. Estratigrafía de la Cordillera de la Costa, al sur de Taltal, Chile. Revista Geológica de Chile No. 24, p. 19-28.
- Suárez y Bell, 1992. Triassic rift-related sedimentary basins in northern Chile (24°-29°S). Journal of South American Earth Sciences 6: 190-19

Trilobites del Cámbrico Superior - Ordovícico Inferior (Tremadociano) de la Formación Mireles, El Baúl, Estado Cojedes, Venezuela

Luis A Molina León¹, Oscar Odreman²

(1) Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida "Kléber Ramírez" Tecnología, Programa Nacional de Formación en Geociencia (PNF en Geociencia), Ejido, Estado Mérida, Venezuela

(2) Universidad de Los Andes, Laboratorio de Paleontología Dr. Oscar Odreman, Ingeniería, Mérida, Venezuela

La Formación Mireles, aflora a lo largo de una faja de 3 a 5 km de anchura en el extremo noroccidental del macizo de El Baúl, estado Cojedes, conformando bajas y aisladas colinas, tales como los cerros Mireles, San Patricio, Grande, De Silva, Casupal. De base a tope, la formación presenta filitas carbonáceas foliadas grises y negras; meta limolitas filíticas micáceas gris verdoso con trilobites y metalimolitas grises, densas, localmente arenáceas, con estructuras sedimentarias e intercaladas con filitas gris verdoso y con cuarcitas micáceas orientadas. Los trilobites de la Formación Mireles (El Baúl, distrito Girardot, estado Cojedes) están representados principalmente por olénidos. Se describen por primera vez las nuevas especies encontradas *Leptoplastus* (Angelin, 1854) y *Jujuyaspis keideli* (Kobayashi, 1936) ubicadas en las quebradas al sur de cerro Mireles. Según (Maync, 1956), la fauna de *Olenellus thompsoni*, *Paedeumias* sp. y *Wanneria* sp. son del Cámbrico Inferior. (Frederickson, 1958) asignó todos los ejemplares del material recolectado por Martín-Bellizzia en el cerro Mireles como pertenecientes a una sola especie *Parabolina Argentina*, del Tremadociano inferior de Argentina y Bolivia. Frederickson (1958) citó una revisión hecha por Kobayashi según la cual esta especie corresponde al Cámbrico Superior (Croixiano). Los olénidos hallados en la Formación Mireles son: *Parabolina* (*Neoparabolina*) *frequens* argentina (Harrington & Leanza, 1957), representando un intervalo de transición entre Cámbrico Superior y Ordovícico Inferior, definida como la biozona de la *Parabolina* (N) *frequens* argentina. El sector inferior de la biozona se caracterizó por la presencia del *Leptoplastus* (Angelin, 1854) de ocurrencia Cámbrico Superior que definen la posible edad para la base de la formación, mientras que la parte superior se diagnostica con el registro del *Jujuyaspis Keideli* (Kobayashi, 1936) de edad Ordovícico Inferior (Tremadociano). Según (Kayser, 1876) la *Parabolina* (N) *frequens* argentina es un taxón de alta representación en Argentina, Bolivia, Venezuela y México. Basados en la biozona de la *Parabolina* (N) *frequens* argentina se define una edad para la Formación Mireles de Cámbrico Superior a Ordovícico Inferior (Tremadociano). De acuerdo a los trilobites registrados se puede interpretar un ambiente de depositación marino de plataforma desde sublitoral a litoral para la Formación Mireles.

Palabras Clave: Formación Mireles, *Leptoplastus*, *Jujuyaspis Keideli*, *Olenellus thompsoni*, *Parabolina Argentina*.

Agradecimientos: Un especial agradecimiento al Dr. Oscar Odreman por todo el apoyo brindado para el desarrollo del presente estudio.

Estratigrafía secuencial continental de las Gravas de Atacama en el cañón del Río Salado, 26° Lat. S.

Sebastián Muñoz-Farías¹, Gissel Alday-Galleguillos¹, Rodrigo Riquelme¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Las Gravas de Atacama forman la cobertura sedimentaria del Cenozoico tardío del sur del Desierto de Atacama. Se extienden desde la Depresión Central hasta la Precordillera, con una potencia, en el cañón del Río Salado (~26° Lat. S), de hasta 400 metros. La exposición de las Gravas de Atacama en este cañón da la oportunidad de comprender su significado para la evolución geológica del antearco de esta región. Se propone restringir los controles de la sedimentación de las Gravas de Atacama a través de un estudio de estratigrafía secuencial continental complementado con antecedentes climáticos y tectónicos del antearco Andino. Se identificaron secuencias depositacionales mediante unidades estratigráficas y límites de superficies, análisis de facies y elementos arquitecturales, y forma y litología de clastos. En las secuencias se identificaron patrones de apilamiento de estratos y amalgamación de canales, que definen cortejos de alta y baja amalgamación que permiten establecer una relación entre espacio de acomodación fluvial y aporte de sedimentos (Catuneanu, 2017). Las Gravas de Atacama se pueden dividir en tres secuencias depositacionales separadas por discontinuidades subaéreas. En orden estratigráfico son: (1) La Secuencia Amarilla, restringida a la Precordillera, corresponde a un ambiente fluvial trenzado con abundantes canales amalgamados y clastos redondeados cuya proporción disminuye hacia el techo, indicando una disminución de la energía y transporte de sedimentos. En esta secuencia se define un cortejo de alta amalgamación. (2) La Secuencia Gris corresponde a abanicos aluviales de flujos desconfiados y en masa, estrato- y grano-decreciente, y con clastos menos redondeados hacia el techo, indicando una disminución en la energía de los flujos. En esta secuencia se define un cortejo de baja amalgamación. (3) La Secuencia Café corresponde a planicies fluviales efímeras con depósitos de flujos desconfiados de alta energía y en láminas y levemente estrato-decreciente. En esta se definen dos cortejos de baja amalgamación. El primero, en la Precordillera, entre ~20 y ~9 Ma, con mayor proporción de clastos angulosos hacia el techo, indicando una disminución de la energía o menor transporte de sedimentos; y el segundo, en la Depresión Central, entre ~9 y ~4 Ma, con mayor proporción de clastos bien redondeados indicando transporte de larga distancia o reciclaje. Estos cortejos sedimentarios pueden interpretarse en términos de la evolución geológica del antearco Andino como sigue: (a) La Secuencia Amarilla rellenó un abrupto relieve que supera los 2000 metros de relieve local, y que fue la respuesta geomorfológica a la Fase Tectónica Incaica (Riquelme et al., 2007). La alta amalgamación del cortejo que se define en esta secuencia podría ser la respuesta a la etapa de declive final de la Fase Tectónica Incaica. (b) Entre las secuencias Amarilla y Gris, en la Precordillera, hay un cambio de alta a baja amalgamación de canales. Esto pudo ser la respuesta a un cambio local en la cuenca o a un bajo alzamiento post-Fase Tectónica Incaica. (c) En la Precordillera, la discontinuidad subaérea sobre la Secuencia Gris y la depositación de la Secuencia Café fue la respuesta a la reestructuración del paisaje producto de la captura geomorfológica de los drenajes de la vertiente oriental de la Precordillera. (d) El fin de la depositación de la Secuencia Gris en la Depresión Central y de la Secuencia Café en la Precordillera coincide con el establecimiento del clima hiperárido en el Mioceno Tardío, que ocurre entre ~11 a ~9 Ma, como lo indican las constricciones geocronológicas de paleosuelos interestratificados en las Gravas de Atacama (Rech et al., 2019), las edades de exposición de superficies en el Peditano de Atacama (Muñoz-Farías, 2023) y de mineralización supérgena (Bissig y Riquelme, 2010). Por ende, el bajo aporte de sedimentos evidenciado en los cortejos de baja amalgamación en ambas secuencias, fue debido a la hiperaridez. (e) La depositación de la Secuencia Café en la Depresión Central ocurre a pesar de las condiciones hiperáridas, siendo una respuesta al Alzamiento Andino del Mioceno medio (e.g., Garzione et al., 2014), y al clima semiárido restringido a las altas cumbres de la Precordillera durante el Plioceno (Bissig and Riquelme, 2010). La baja amalgamación de canales de la Secuencia Café en la Depresión Central, pudo ser la respuesta a cambios tectónicos regionales y climáticos locales. En conclusión, cortejos de alta amalgamación de canales pueden indicar la etapa de declive final de la Fase Tectónica Incaica, y los cortejos de baja amalgamación de canales indicarían el establecimiento de la hiperaridez del Mioceno Tardío y el alzamiento Andino del Mioceno Medio, además de condiciones locales.

Palabras Clave: Estratigrafía Secuencial, Gravas de Atacama, Desierto de Atacama, Hiperaridez, Cuencas cenozoicas.

Financiamiento: Beca de Postgrado UCN de la Universidad Católica del Norte y Beca de Doctorado Nacional ANID N°211849. Proyectos FONDECYT N°1170992 y N°1220987.

Referencias:

- Bissig, T., Riquelme, R. (2010). Andean uplift and climate evolution in the southern Atacama Desert deduced from geomorphology and supergene alunite-group minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.* 299 (3–4), 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.028>.
- Catuneanu, O. (2017). Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology, (October), 1–57. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2017.07.003>.
- Garzione, C.N., Auerbach, D.J., Jin-Sook Smith, J., Rosario, J.J., Passey, B.H., Jordan, T.E., Eiler, J.M., (2014). Clumped isotope evidence for diachronous surface cooling of the Altiplano and pulsed surface uplift of the Central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 393, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.029>.
- Muñoz-Farías, S., Ritter, B., Dunai, T. J., Morales-Leal, J., Campos, E., Spikings, R., & Riquelme, R. (2023). Geomorphological significance of the Atacama Peditano as a marker for the climatic and tectonic evolution of the Andean forearc, between 26 ° to 28 ° S. *Geomorphology*, 420. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108504>.
- Rech, J. A., Currie, B. S., Jordan, T. E., Riquelme, R., Lehmann, S. B., Kirk-lawlor, N. E., Shanying L., Gooley, J. T. (2019). Massive middle Miocene gypsic paleosols in the Atacama Desert and the formation of the Central Andean rain-shadow. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.040>.

Ambiente sedimentario y cronología en la localidad tipo de Formación Colimapu, Cuenca del Río Maipo, Región Metropolitana, Chile

Nicolás Olivares¹, Reynaldo Charrier¹⁻², María Pía Rodríguez¹⁻³, Tania Villaseñor⁴, Felipe Tapia⁵

(1) Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Campus República, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copiapó, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(5) Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber", Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Int. Güiraldes 2160 (C1428EGA), Buenos Aires, Argentina

La Formación Colimapu (Klohn, 1960) consiste en una sucesión estratificada conocida en la Cordillera Principal de Chile central que corresponde a los depósitos de la regresión final de la cuenca mesozoica de trasarco en el Cretácico Inferior tardío. Estos depósitos se disponen concordantemente y en transición sobre la Formación Baños del Flaco, marina, y está compuesta por aproximadamente 1.500 m de espesor de estratos sedimentarios característicamente rojizos dispuestos en un apretado sinclinal con vergencia al este. Su localidad tipo se encuentra en la quebrada La Mona, al SE de Las Melosas, valle del río Maipo a 34° S, donde forma un apretado sinclinal. El análisis de esta sucesión se centró en determinar: (I) las condiciones ambientales y sedimentológicas que controlaron su depósito, (II) la proveniencia de los sedimentos, y (III) la edad del depósito.

Estos depósitos consisten en una alternancia de capas siliciclásticas, carbonatadas y, ocasionalmente, de finas capas de ceniza volcánica. Las intercalaciones siliciclásticas, predominantemente de grano fino, varían entre areniscas finas, areniscas calcáreas y limolitas. En algunas capas delgadas se observó fina estratificación cruzada. Estos depósitos consisten en cuarzo, plagioclasa, fragmentos líticos, predominantemente volcánicos y, en menor medida, sedimentarios; en todas las muestras se observaron minerales opacos. Ocasionalmente contienen laminillas de muscovita e intraclastos calcáreos. Los componentes detríticos son subredondeados, excepto en la parte superior de la sucesión, donde son subangulares. La coloración rojiza se debe, en general, a la presencia de cemento hematítico o a un recubrimiento hematítico de los granos. Las intercalaciones carbonatadas se clasificaron como mudstone, wackestone y packstone, con finas laminaciones de arenisca finas y limo. El contenido fosilífero, presente en ambos tipos de intercalaciones, corresponde a valvas de ostrácodos, generalmente completas en capas de arenisca calcárea y desarticuladas en capas carbonatadas. Por otro lado, y únicamente en rocas carbonatadas, se observaron oogonias de algas carófitas, generalmente acompañadas de valvas desarticuladas de ostrácodos.

El análisis de las facies, sus asociaciones, y el contenido fosilífero permiten concluir un ambiente lacustre de agua salobre. Por otra parte, la composición y los rasgos texturales de los componentes detríticos indican dos fuentes principales en la evolución de la etapa regresiva de la cuenca de trasarco. La primera, dominante excepto en la parte más alta de la sucesión, corresponde a un basamento elevado asociado a un bloque continental, ubicado al este de estos depósitos. Hacia el techo, los aportes sedimentarios se habrían originado en regiones occidentales atribuidas al arco magmático, ubicado en la actual Cordillera de la Costa, que bordeaba a la cuenca por el oeste. La presencia de componentes de procedencia oriental indicaría que el bloque de basamento que habría generado dos depocentros, uno occidental y uno oriental, en la cuenca de trasarco en el Cretácico Superior (Tapia et al., 2020) ya habría estado expuesto al final del Cretácico Inferior.

Debido a la escasa población de circones recuperada de las muestras no se obtuvieron edades U/Pb confiables. Por esta razón y por la relación transicional con la infrayacente Formación Baños del Flaco (Titoniano - Hauteriviano), se acepta la edad Aptiano-Albiano previamente propuesta por Martínez y Osorio (1963), basada en la presencia de oogonias de carófitas. Por otra parte, en la parte superior del cordón que bordea la quebrada La Mona por el este, se encontró en una sucesión sedimentaria roja, previamente atribuida a la Formación Colimapu por González (1963) y Charrier (1981), cubierta por un espesor de unos 50 m de lavas andesíticas no reportadas hasta la fecha. Una muestra de la parte sedimentaria arrojó una edad de 17.82 ± 0.23 Ma con lo que se descarta su pertenencia a la Formación Colimapu y se la incluye en una nueva unidad que proponemos designar junto con las lavas que la sobreyacen como Unidad Volcano-Sedimentaria Cordón Las Lagunas. Los estratos rojos se interpretan como depósitos sintectónicos del Mioceno inferior generados con el alzamiento causado por la inversión de la cuenca de Abanico. En esta región, el borde oriental de esta cuenca está determinado por la falla El Diablo, la que, a su vez, define el límite occidental de los afloramientos de la Formación Colimapu. De acuerdo con lo anterior, se propone que el movimiento inverso de esta falla haya causado el apretado sinclinal con vergencia al este que afecta a las capas de la Formación Colimapu. Así mismo, se propone que la actividad que dio origen a las lavas pudo aprovechar la presencia de esta falla en su ascenso.

Palabras Clave: Formación Colimapu, Cretácico inferior, Chile, Andes, Análisis de facies.

Financiamiento: Se agradece al proyecto Fondecyt #1210475 por el financiamiento de la campaña de terreno y los diversos análisis realizados en las muestras.

Agradecimientos: Se agradece a los colaboradores de este proyecto y a la administración del Fundo Cruz de Piedra, por permitir el paso a sus dependencias durante el terreno de la investigación.

Referencias:

- Charrier, R. (1981). Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34° und 34°30'südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paläogeographische Entwicklung. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen.
- González, O., 1963. Observaciones geológicas en el valle del Río Volcán. Revista Minerale, Santiago, 17(81), 20–61
- Klohn, C. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provs. de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín, 8, 95 p., Santiago.
- Martínez-Pardo, R. y Osorio, R., (1963). Consideraciones preliminares sobre la presencia de Carófitas fósiles en la Formación Colimapu. Revista Minerale, N°82, 28–43.
- Tapia, F., Muñoz, M., Farías, M., Charrier, R., Astaburuaga, D. (2020). Middle Jurassic-Late Cretaceous paleogeography of the western margin of the Neuquén basin (34° 30'–36° S), in: D. Kietzmann and A. Folguera (eds.), Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes, Springer Earth System Sciences, p. 269–301.

Estratigrafía y análisis de facies fluvio-aluviales de las sucesiones sedimentarias de la Quebrada La Leonera, Los Andes, Región de Valparaíso

Sebastián Ortega Verdugo¹⁻², Samantha Leiva Mera¹⁻², Sebastián Montti², Juan Pablo Letelier Araya²⁻³, Valeria Banda Molina²⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Gestión Ambiental S.A., Rosario Norte 100, Las Condes, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, República 220, Santiago, Chile

(4) Universidad San Sebastián, Facultad de Economía y Gobierno, Lota 2465, Santiago, Chile

En la Región de Valparaíso, aproximadamente a 15 km al este de la ciudad de Los Andes en las faldas del cerro Montudo, se encuentra la localidad de quebrada La Leonera. En este sector se distingue una serie de sucesiones sedimentarias y volcanosedimentarias bien estratificada de carácter continental, que aflora hacia el este de la Zona de Falla Pocuro. La serie de estratos expuestos a lo largo de la quebrada se observan con una actitud promedio de $330^{\circ}/33^{\circ}$. Nuevos datos geocronológicos de U-Pb en circones indican edades burdigalianas para esta sucesión. El trabajo aquí presentado, expone los resultados de la realización de 6 columnas estratigráficas de detalle que suman un espesor aproximado de 230 m en las sucesiones sedimentarias de la quebrada La Leonera. Se incluyen además las determinaciones de facies sedimentarias presentes entre estas secuencias, a partir de los criterios expuestos en Miall (1996).

La sección basal de la sucesión estratigráfica comienza con un nivel de tobas de lapilli cristalinas, seguidas de manera concordante por niveles decamétricos de conglomerados clasto soportados toscamente estratificados (Gh), alternados con estratos lenticulares de areniscas de grano medio de coloración verdosa y estratificación cruzada en artesa (St), los que preservan abundante contenido de taoflora fósil de Angiospermas y Gimnospermas. Este último paquete es seguido por alternancias métricas entre areniscas de grano fino a grueso con presencia de laminación paralela (Sh), que se aprecian alternadas con conglomerados finos clasto soportados (Gh).

Hacia la parte superior de la sucesión se registra una amplia variabilidad litológica, ejemplificada de manera general por alternancias decimétricas entre conglomerados (Gh) y areniscas de grano fino a medio con laminación paralela (Sh), limolitas con restos vegetales carbonizados (Fsm) y un potente nivel métrico de brechas sedimentarias masivas (Gmm) con restos de troncos fósiles de gran tamaño. La secuencia continúa con alternancias rítmicas entre areniscas de granulometría fina y areniscas de granulometría media, ambas con abundantes restos vegetales y laminación paralela (Sh). Finalmente, en el tramo superior de la columna, se aprecian capas centimétricas de carbón (C), seguidas de niveles rítmicos compuestos por areniscas de granulometría muy fina y granulometría de grano medio (Sh), coronados por areniscas gruesas que contienen estratificación cruzada en artesa (St) y estratos lenticulares de conglomerados finos (Gh).

De los resultados de los análisis estratigráficos y de facies sedimentarias se puede desprender que las secuencias se formaron en un ambiente continental fluvio-aluvial altamente agradable, caracterizado por un fuerte dinamismo de los productos sedimentarios debido a la avulsión de canales. Las facies conglomerádicas Gh dominan en las partes basales y medias de la sucesión, y se caracterizan por la intercalación de depósitos de carga de fondo y barras fluviales. Si bien las facies de areniscas se aprecian a lo largo de toda la sucesión, estas se hacen dominantes hacia el tramo superior de la secuencia, donde se aprecia el desarrollo de facies St, que marca los procesos de migración de formas de lecho (barras y dunas) y acreción sedimentaria. Por otro lado, en las secciones donde se aprecia las facies Sh indicaría eventos esporádicos de alta energía como inundaciones repentinas. En el techo de la sucesión, la aparición de las facies C, Sh y Fsm donde se desarrollan niveles de carbón junto con areniscas y limos con presencia de restos vegetales carbonizados, representan el establecimiento de posibles llanuras de inundación. Las rocas sedimentarias tienen una fuerte influencia volcánica, evidenciado tanto en la composición de las rocas, como en productos volcanogénicos que se aprecian en terreno.

Las características de los depósitos sedimentarios aquí expuestos suponen que el ambiente deposicional estaría dominado por sistemas fluviales trenzados, los cuales se habrían desarrollado en una zona de baja pendiente con frecuentes inundaciones esporádicas.

Palabras Clave: Facies sedimentarias, Taoflora, Estratigrafía, Burdigaliano, Mioceno.

Referencias:

- Miall, A. (1996). The geology of fluvial deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. Springer-Verlag: 99-130 p.

Conservación y preparación técnica para la determinación taxonómica de invertebrados marinos: Abundancia y morfometría

Andrea Quilamán¹⁻², Scarlett Camus², Valeria Jordán¹⁻², Loreto Torres¹, Karla Jara¹, Daniel Manríquez¹, Rodrigo Orrego¹

(1) Laboratorio de Patrimonio, Gestiona Consultores Spa, Santiago, Chile
(2) Carrera de Geología, Universidad Santo Tomás, Santiago

En el marco del cumplimiento de los compromisos ambientales asociados al proyecto Quebrada Blanca Fase 2 (QB2), RCA N° 074/2018, en la región de Iquique, se llevó a cabo la recolección de más de 1000 ejemplares fósiles asociados a la componente paleontológica. Estos, se encuentran distribuidos en las unidades geológicas como: Fm. Quehuita (Vergara y Thomas 1984), Depósitos Litorales (Marquardt et al., 2008) y Depósitos Aluviales Antiguos (Vásquez y Sepúlveda, 2013). La recolección abarcó principalmente clases de invertebrados marinos como: Bivalvos, Gasterópodos y Cefalópodos.

Realizamos la determinación taxonómica de los ejemplares y la puesta en valor patrimonial de estos. Para lo cual se llevó a cabo la preparación y conservación paleontológica utilizando criterio de mínima intervención para lograr la mejor exposición de sus caracteres morfológicos. Estas técnicas incluyeron métodos manuales, químicos y mecánicos, con especial atención en reducir el tamaño de los ejemplares (removiendo la matriz). Asimismo, se aplicaron técnicas de conservación para mantener los ejemplares en un estado inerte, priorizando la optimización del espacio mediante niveles de bandejas y otras técnicas de montaje para la colección paleontológica final, teniendo en cuenta la limitación de espacio existente hoy en los museos a nivel nacional.

En la elaboración de esta colección incluimos la determinación taxonómica mediante anatomía comparada y un análisis morfométrico de los ejemplares Pleistocenos-Holocenos, con el objetivo de identificar la concentración y variación de especies. A continuación, damos a conocer las diversas técnicas de preparación y conservación utilizadas en la elaboración de colecciones paleontológicas. Además, se discute acerca de la tendencia de tamaños y concentración en las especies de invertebrados marinos (Pleistocenos-Holocenos), estableciendo una comparación con la fauna actual de la costa de Chile.

Proporcionamos nuevos alcances en la conservación del patrimonio paleontológico para la región de Iquique y, potencialmente, en otros lugares. Los hallazgos iniciales sugieren la existencia de patrones de crecimiento y concentración en las especies de invertebrados marinos (Pleistocenos-Holocenos). Los primeros resultados obtenidos revelan que las poblaciones de las clases Gastropoda y Bivalvia (e.g., *Leukoma thaca*, *Perumytilus purpuratus*) se encontraban en estadios de crecimiento juvenil-adulto. Por lo que planteamos la interrogante, si la tendencia morfométrica responde a un factor paleoecológico, o más bien a metodología de muestreo de estos ejemplares.

Palabras Clave: Cuaternario, conservación, paleontología, invertebrados.

Financiamiento: Gestiona Consultores SpAQB2 – Teck.

Agradecimientos: Laboratorio Paleontología, Gestiona Consultores QB2, TECK.

Distribución y deformación de las unidades mesozoicas y cenozoicas entre Las Minillas y Catemu, Chile central (~32.51°S) y sus implicancias paleogeográficas

Valentina Ramos Oliver¹, Luisa Pinto Lincof¹, Valentina Flores Aqueveque¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Plaza Ercilla #803, Santiago Centro, Santiago, Chile

La transición entre el Cretácico Temprano y el Cretácico Tardío representa un momento crucial para la evolución de la orogenia en los Andes de Chile central (c.a 32°51'S, 70°44'E), gatillada por el cambio de un periodo predominantemente extensional a un régimen compresivo, en lo que se conoce como Fase u Orogenia Peruana (e.g. Charrier et al., 2007, 2014; Boyce, 2015; Fennell et al., 2017; Horton, 2018). Esta nueva etapa de la evolución Andina, caracterizada por un régimen compresivo y la construcción de montañas, habría traído consigo importantes cambios tanto tectónicos como paleogeográficos en el margen andino, afectando a las diferentes cuencas extensionales y sus depósitos asociados. Entre los 31-33°S se han reconocido depósitos sinorogénicos coetáneos con esta fase compresiva tanto en la Cordillera de la Costa como en la Cordillera Principal hacia Argentina que darían cuenta del desarrollo de una cuenca de antepaís durante esta fase (Mackaman-Lofland et al., 2019; Boyce, 2015). Por otra parte, se ha registrado a dichas latitudes el Sistema Estructural Pocuro (SEP) que serviría como mecanismo principal en la formación de la Depresión Central y configuración actual de los Andes Centrales entre los 31-34°S, actuando como límite geomorfológico entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal, y separando a las unidades mesozoicas de las cenozoicas (Charrier et al., 2007; Jara, 2013). Estos antecedentes han motivado una serie de estudios en la zona, que han tenido como objetivo identificar el contacto entre dichas unidades, situándolo en distintas ubicaciones geográficas. Sin embargo, existen escasos estudios de sedimentología y cronología de las unidades meso-cenozoicas, así como de la deformación que las afectan.

De esta manera, en este trabajo se realiza un estudio de los principales depósitos de las formaciones que afloran al oeste del SEP a los 32.51°S, en el borde occidental de la Cordillera Principal de los Andes hasta el borde oriental de la Cordillera de la Costa (70°33'-70°55'E), para establecer su distribución y caracterizar el contexto tectónico y paleogeográfico en el que se depositaron. Para esto se está desarrollando un modelo evolutivo paleogeográfico, con especial énfasis en la caracterización sedimentológica de la Formación Las Chilcas y la reconstrucción de los ambientes sedimentarios que dieron origen a sus depósitos. Se presentarán además nuevos datos estratigráficos para las formaciones definidas en la zona y correlaciones en base a estos hallazgos.

Los datos de terreno han permitido definir la distribución de las unidades en la zona, ubicando depósitos de la Formación Abanico al oeste de la SEP en contacto con la Formación Las Chilcas. Además, en relación a definiciones estratigráficas, se conserva el esquema establecido por Boyce (2015) y Boyce et al. (2020) en la zona que divide la Formación Las Chilcas en cuatro miembros principales: Pitipeumo (~105-100 Ma), Tabón (~100-95 Ma), Ñilhue (~95-91 Ma) y El Calvario (~91-83 Ma). Además, en este trabajo se divide a la Formación Cerro Morado en dos miembros principales: un miembro basal donde predominan lavas andesíticas porfíricas, que en algunas zonas presentan cristales de plagioclasa centimétricos, y un miembro superior constituido principalmente por tobas líticas. Los depósitos de la Formación Cerro Morado están ubicados principalmente en el sector occidental de la zona de estudio.

Los resultados preliminares del análisis sedimentológico de la Formación Las Chilcas indican que el carácter volcano-sedimentario de los depósitos de los miembros Pitipeumo y Tabón estarían asociados a grandes abanicos aluviales desarrollados sobre el nivel base de los ríos, depositándose en discordancia erosiva sobre la Formación Cerro Morado, acompañadas por episodios volcánicos intermitentes. Mientras que las rocas calcáreas y facies arenosas agrupadas en el miembro Ñilhue estarían asociadas a un ambiente subacuático somero de baja energía, etapa en la que se habría producido una merma en la actividad volcánica. El miembro El Calvario, en contraste, marca el reinicio de actividad volcánica en la zona junto con un retrabajo aluvial reflejado en sus litofacies.

Palabras Clave: Orogenia Andina, Cretácico Medio-Tardío, Formación Las Chilcas, Andes Centrales, Paleogeografía.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: Se agradece al equipo Mountain Building por toda su colaboración, al curso de Campo 1- primavera 2022 de la Universidad de Chile y a los ayudantes Aníbal Zambrano y Matías Silva.

Referencias:

- Boyce, D., 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile Central durante el Cretácico medio-tardío: el registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. Tesis de Magíster. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136442>.
- Boyce, D., Charrier, R., Fariás, M., 2020. The first Andean compressive tectonic phase: Sedimentologic and structural analysis of mid-Cretaceous deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39, e2019TC005825. <https://doi.org/10.1029/2019TC005825>.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geological Society Special Publication*, 21–114. [doi: 10.1144/gsp.21.3](https://doi.org/10.1144/gsp.21.3).
- Charrier, R., Ramos, V.A., Tapia, F., Sagripanti, L., 2015. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31° and 37° S (Chile and Western Argentina). *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 13-61.
- Fennell, L.M., Folguera, A., Naipauer, M., Gianni, G., Rojas Vera, E.A., Bottesi, G., Ramos, V.A., 2017. Cretaceous deformation of the southern Central Andes: synorogenic growth strata in the Neuquén Group (35° 30'–37° S). *Basin Research*, 29, 51-72.
- Horton, B.K., 2018. Tectonic regimes of the central and southern Andes: responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37(2), 402429.
- Jara, P., 2013. Tectónica mezo-cenozoica en la Cordillera Principal de Chile central entre 32° y 33°S. Análisis a partir de nuevos antecedentes de campo y modelamiento analógico. Tesis de Doctorado (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 249 pp.
- Mackaman-Lofland, C., Horton, B. K., Fuentes, F., Constenius, K. N., Stockli, D.F., 2019. Mesozoic to Cenozoic retroarc basin evolution during changes in tectonic regime, southern Central Andes (31–33°S): Insights from zircon U-Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 299 p.

Primeras aproximaciones a un catastro paleontológico nacional (CPN): Aplicación de base de datos como herramienta para proyectos de inversión e investigación

Thomas Valenzuela Castro¹, Sebastián Ortega Verdugo¹⁻², Samantha Leiva Mera¹⁻², Sebastián Montti², Juan Pablo Letelier Araya²⁻³, Valeria Banda Molina²⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Gestión Ambiental S.A., Rosario Norte 100, Las Condes, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, República 220, Santiago, Chile

(4) Universidad San Sebastián, Facultad de Economía y Gobierno, Lota 2465, Santiago, Chile

La paleontología en Chile, como actividad científica, comienza en el siglo XIX con las primeras observaciones y colecciones de figuras como Charles Darwin, Claudio Gay y Rodolfo Philippi (Castro et al., 2006; Rubilar, 2008; Tamayo-Hurtado, 2009). Desde dicha época hasta la actualidad, el número de hallazgos paleontológicos en el territorio nacional ha crecido exponencialmente, de modo que hoy en día todas las regiones del país cuentan con algún tipo de registro fósil. De la misma manera, el número de publicaciones científicas y reportes de taxones fósiles se ha incrementado producto del aumento significativo de profesionales especializados en distintas áreas académicas relativas a la componente paleontológica. Sumado a esto, nuevos materiales fosilíferos son reportados frecuentemente por el desarrollo y puesta en marcha de proyectos de inversión que requieren dar cumplimiento a la normativa ambiental vigente.

En la actualidad la recopilación de antecedentes paleontológicos debe considerar diferentes aspectos metodológicos, que tienen como punto clave de convergencia un exhaustivo proceso de revisión bibliográfica. Hoy en día, sólo las regiones de Atacama y Coquimbo cuentan con bases de datos detalladas para su patrimonio paleontológico (Rivas et al., 2016; González-Tejo et al., 2022). Por otro lado, una de las plataformas más completas disponibles: *Paleobiology Database* (PBDB), carece de muchos reportes y maneja ubicaciones demasiado generales que en muchos casos no representan la distribución espacial real de algunos sitios. Como consecuencia de lo anterior, resulta indispensable tener un catastro detallado de la taxonomía, cronología, ubicación geográfica y contexto geológico de las ocurrencias fosilíferas de todo el territorio nacional.

En el presente trabajo, se exhibe el resultado preliminar de la confección de un Catastro Paleontológico Nacional (CPN), consistente en una base de datos paleontológica actualizable, que contiene puntos georreferenciados distribuidos a lo largo del territorio nacional e información de relevancia asociada. Para su desarrollo se recopilaron datos de cada región individual a través de múltiples fuentes bibliográficas consistentes en artículos científicos, cartas u hojas geológicas, PBDB, antecedentes recopilados desde el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y libros realizados por organizaciones científicas, los que fueron complementados entre sí para una mayor precisión. Cabe señalar que en esta etapa se evitó la inclusión de información de fuentes informales o de baja confiabilidad para reducir el sesgo metodológico.

La información de relevancia antes mencionada es dispuesta en tablas de datos, las que pueden ser procesadas en software de SIG en función de los requerimientos del usuario. Permitiendo, entre otras aplicaciones, la identificación de localidades fosilíferas de interés, zonas de potencialidad patrimonial, identificación de distribución de grupos taxonómicos y el desarrollo de recursos cartográficos de variada índole, como mapas regionales de distribución y densidad de colecciones paleontológicas.

Se espera que el CPN sea una herramienta en constante desarrollo que pueda ser actualizada constantemente de cara al futuro, incorporando nueva información que sea revelada con el paso de los años, para poder acercarse cada vez más a un registro completo y detallado de ocurrencias fosilíferas a nivel nacional.

Palabras Clave: Paleontología en Chile, distribución espacial, fósiles, Catastro Paleontológico Nacional.

Agradecimientos: Mis sinceros agradecimientos a la empresa Gestión Ambiental S.A.

Referencias:

- Castro, S., Camousseight, A., Muñoz-Schick, M. y Jaksic, F. (2006). Rodolfo Amando Philippi, el naturalista de mayor aporte al conocimiento taxonómico de la diversidad biológica de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79: 133-143
- González-Tejo, M., Ledezma-Durán, L., Rivadeneira, M. y Chávez-Hoffmeister, M. (2022). Aplicación de análisis de bases de datos paleontológicas para estudios de distribución geográfica: Región de Atacama como un caso de estudio para identificación de localidades de interés, zonas de riesgo y sesgos metodológicos. Libro de Resúmenes II Congreso Chileno de Paleontología, Tagua Tagua, pp. 143
- Rubilar, A. (2008). Paleontología, patrimonio paleontológico y sus vínculos con la biología y geología. Libro de Actas I Simposio Paleontología en Chile, pp. 3-9
- Rivas, H., Rincón, I. y Aravena, D. (2016). Cartografía de potencialidad y vulnerabilidad: Uso de herramientas digitales para la valoración del patrimonio paleontológico nacional. Libro de Resúmenes V Simposio de Paleontología de Chile, Concepción, pp. 129-131.
- Tamayo-Hurtado, M. (2009). Charles Darwin y el darwinismo en Chile. *Theoria*, 18 (1): 19-33.

Modelo de facies sedimentarias Yacimiento Zona Glauconítica Arenal, Tierra del Fuego, Chile

Daniela Vallejos¹, Aníbal Velásquez¹, Álvaro Pérez¹

(1) Empresa Nacional del Petróleo, Exploraciones, José Nogueira #1101, Punta Arenas, Chile

La Zona Glauconítica, definida por Mohr (1945), corresponde a una unidad informal del subsuelo de la Cuenca de Magallanes, ubicada a la base del Paleógeno en Tierra del Fuego. Ella corresponde a una unidad marina de plataforma media a externa desarrollada durante una transgresión marina generalizada durante el Paleoceno y Eoceno en la Cuenca de Magallanes (Hauser, 1964; Natland et al., 1974; Biddle et al., 1986; Pinto et al., 2022).

El interés por esta unidad surge de las acumulaciones de gas no convencional que contiene; de ahí la necesidad de estudiar los patrones de apilamiento tanto verticales como laterales de la base de la secuencia paleógena. Este trabajo busca reconocer las facies sedimentarias que constituyen el reservorio de la Zona Glauconítica, los mecanismos de generación de porosidad secundaria y su distribución. Para este propósito se cuenta con el análisis detallado de testigos corona de 4 pozos y testigos laterales rotados distribuidos en el bloque arenal, junto a análisis de cortes transparentes y microscopía electrónica de barrido (MEB).

El reservorio de la Zona Glauconítica tiene un espesor aproximado de 50 m o más (Gonzalez et al., 2018), en los cuales se distribuyen cinco facies, discriminadas a partir de los testigos corona, que corresponden principalmente a rocas clásticas de grano fino a muy fino y en menor cantidad medio, que de base a techo corresponden a 1) Pelitas grises P(g), las cuales se caracterizan por presencia de microfósiles y diagénesis moderada a baja; 2) Wackas verdes W(v), ellas corresponden a rocas con un porcentaje superior al 12% de granos verdes glauconíticos derivados de bioclastos y/o de peloides, los cuales con frecuencia se encuentran parcialmente disueltos; 3) Arcillolitas tobáceas A(t), caracterizadas por presentar abundante microcuarzo, plagioclasas y microporosidad; 4) Wackas tobáceas W(t), las que presentan clastos de plagioclasas y líticos andesíticos además de porosidad móldica, pseudomatriz tobácea y una diagénesis intensa 5) Wackas con deformación sin-sedimentaria W(sd) diferenciadas por un alto grado de fracturamiento tanto en macro y microescala además de tener un alto contenido de Fe. Estas facies sedimentarias se encuentran integradas por 9 o más microfacies observadas bajo el microscopio óptico donde fue posible distinguir tanto procesos depositacionales como diagenéticos, estos últimos son los responsables de la porosidad secundaria móldica de las rocas de la Zona Glauconítica, determinante en la acumulación de gas del yacimiento.

En este estudio se analiza la variación lateral de facies entre wackas tobáceas W(t), que tienen un porcentaje de poros móldicos que bordea el 20%, y wackas verdes W(v), que presentan granos verdes glauconíticos con algún grado de disolución. Aquí se investiga si la porosidad secundaria está relacionada con la disolución de granos verdes o si está vinculada también a otros factores, como cantidad de clastos, generación de cementos tempranos, y/o disolución de componente siliciclásticos.

Además se busca dilucidar cuáles fueron los mecanismos de disolución de los granos verdes, los cuales podrían estar relacionados con la acidificación de pH en los fluidos diagenéticos debido a un aumento de los niveles de CO₂, dejando como resultado cementos carbonáticos y silíceos.

Palabras Clave: Zona Glauconítica, diagénesis, granos verdes, porosidad móldica

Financiamiento: Empresa Nacional del Petróleo (ENAP)

Referencias:

- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum Jr., R.M., Fitzgerald, M.G., y Wright, R.C., 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America, en Allen, P.A., and Homewood, P., eds., Foreland Basins. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, p. 41-63.
- González, A., Valderrama, J.M., Gschaidner, C.T., Adaros, R., Verdugo, M., Canessa, N.D., Pérez, A., Velásquez, A., Sánchez, J., Ahumada, M. y González, M., 2018. Desarrollo del "play tight gas" Zona Glauconítica, Bloque Arenal, Cuenca de Magallanes, Chile: caso estudio. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención, Mendoza, Argentina, p. 455-477.
- Hauser, A., 1964. La "Zona Glauconítica" en la plataforma Springhill, Magallanes, Chile". Tesis no publicada, Universidad de Chile, Escuela de Geología, 266 p.
- Mohr, C., 1945. Columna estratigráfica Pozo Manantiales-1. ENAP, Informe Interno (inédito), 1 p.
- Natland, M.L., González, E., Cañón, A. and Ernst, M., 1974. A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments. Geological Society of America, Memoir 139, p. 1-126.
- Pinto, J., Vallejos, D., González, A., 2022. Geología sedimentaria y diagénesis del reservorio gasífero no convencional paleoceno de la "zona glauconítica", bloque arenal, Tierra del fuego, Chile.

Relación entre inversión tectónica positiva y sistemas de corrimientos en el desarrollo orogénico del antearco andino en la Región de Antofagasta

Renato Cisternas Saldívar¹, Sebastián Espinoza¹, Bastián Herrera¹, Cristopher López¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos #0610, Antofagasta, Chile

Los procesos que condicionan la configuración estructural en el flanco occidental de los Andes Centrales han sido poco claros al tratar de entender los mecanismos estructurales que llevaron a su desarrollo orogénico. En el norte de Chile, la preservación de una extensa superficie de pediplanización y una potente cobertura de gravas ocultan las estructuras profundas en el antearco andino, limitando cualquier tipo de interpretación estructural o estimación de acortamiento cortical. Algunas estimaciones de acortamiento, a los ca. 21° - 23° Lat. S., muestran notorias diferencias entre el flanco occidental (<10 km de acortamiento) y oriental (>250 km de acortamiento) de los Andes Centrales. Por ejemplo, estimaciones de acortamiento para la región del Subandino, asociada con Fajas Plegadas y Corridas Híbridas, indican porcentajes de acortamiento lateral entre 30-65% (Baby *et al.*, 1997; McQuarrie *et al.*, 2005; Arriagada *et al.*, 2008). Mientras que, los pocos cálculos de acortamiento en el antearco indican valores entre 20-45% (Amilibia *et al.*, 2008; Fuentes *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2022; López *et al.*, 2023). La región de antearco, en el norte de Chile, se ha caracterizado por tener dos sistemas estructurales, de oeste a este, estos corresponden al Sistema de Falla de Atacama (Scheuber & González, 1999), expuesto a lo largo de la Cordillera de la Costa, y el Sistema de Fallas de Domeyko (Maksaev & Zentilli, 1999), expuesto a lo largo de la Cordillera de Domeyko. Específicamente para la Cordillera de Domeyko, el estilo estructural ha sido asociado con fallas normales pre-existentes reactivadas como fallas inversas de alto ángulo, provocando anticlinales de inversión de escala kilométrica, alzamiento de sucesiones mesozoicas y transferencia de la deformación a la cubierta sedimentaria cenozoica. Además, en su vertiente occidental, se han reconocido estructuras de inversión tectónica positiva con vergencia oeste afectando las secuencias mesozoicas *syn-rift* y a la cobertura volcano-sedimentaria synorogénica. Sin embargo, la geometría, cinemática y distribución de los estilos estructurales relacionados a la interacción entre inversión tectónica y sistemas de corrimientos no ha sido precisada, generando un desconocimiento en el control y evolución del desarrollo orogénico del antearco andino. En este trabajo, se propone un nuevo modelo de evolución tectónica, aportando nuevas ideas sobre el crecimiento y desarrollo orogénico del antearco de los Andes Centrales. A partir de la re-interpretación de líneas de reflexión sísmica 2-D y datos de campo, se confeccionaron dos restauraciones pre-acortamiento. La primera se ubica a lo largo de los cañones del Río Loa y Río San Salvador, mientras que la segunda corresponde a una sección que atraviesa la localidad de Quebrada Mala. Así, dos estilos estructurales se pueden reconocer sobre el flanco occidental de la Cordillera de Domeyko. El primero corresponde a estructuras de inversión tectónica positiva con vergencia al oeste, las cuales exponen y extruyen el relleno de las cuencas de *rift* del Mesozoico. El segundo consiste en un sistema de corrimientos de vergencia al este que afectan a las secuencias synorogénicas del Cretácico Superior-Eoceno. Las principales estructuras de inversión corresponden a fallas normales parcialmente invertidas, *short-cut faults*, y en menor medida, estructuras *buttressing* con niveles de despegue intraformacionales bivergentes. Los sistemas de corrimiento corresponden a sistemas de dúplex y/o abanicos imbricados. La combinación de ambos estilos “podría” sustentar un mecanismo de cuña intracutánea entre estructuras invertidas con vergencia oeste y estructuras de vergencia este. El acortamiento mínimo estimado para el área del Cañón del Río Loa es de un 11%, mientras que para el sector de Quebrada Mala es de un 56%. Un mayor porcentaje de acortamiento estaría relacionado al desarrollo de estructuras de sistemas de corrimientos de piel fina de vergencia este.

Palabras Clave: Antearco Andino, Inversión Tectónica positiva, Sistemas de Corrimientos, Acortamiento.

Financiamiento: Proyecto VRIDT-UCN2095 Número del Proyecto: 10201251.

Referencias:

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean Mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(12), 1520-1539.
- Arriagada, C., Roperch, P., Mpodozis, C., & Cobbold, P. R. (2008). Paleogene building of the Bolivian Orocline: Tectonic restoration of the central Andes in 2-D map view. *Tectonics*, 27(6).
- Baby, P., Rochat, P., Mascle, G., & Hérail, G. (1997). Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes. *Geology*, 25(10), 883-886.
- Fuentes, G., Martínez, F., Basculán, S., Arriagada, C., & Muñoz, R. (2018). Tectonic architecture of the Tarapacá Basin in the northern Central Andes: New constraints from field and 2D seismic data. *Geosphere*, 14(6), 2430-2446.
- López, C., Cisternas, R., Espinoza, S., González, R., Martínez, F., Riquelme, R., ... & Morales, J. (2023). The effects of positive tectonic inversion structures on the formation of thrust systems on the western Domeyko Cordillera, northern Chile: Implications for the orogenic development of the outer Andean forearc. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104376.
- Maksaev, V., & Zentilli, M. (1999). Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, northern Chile: Implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration and Mining Geology*, 8(1/2), 65-90.
- Martínez, F., López, C., & Cisternas, R. (2022). Loa-Geo1: A field regional transect to unravel the structure of the western Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 104011.
- McQuarrie, N., Horton, B. K., Zandt, G., Beck, S., & DeCelles, P. G. (2005). Lithospheric evolution of the Andean fold-thrust belt, Bolivia, and the origin of the central Andean plateau. *Tectonophysics*, 399(1-4), 15-37.

Los sistemas de corrimientos fósiles bajo la cobertura del Cenozoico tardío en la vertiente occidental de la Cordillera de Domeyko en la Región de Antofagasta

Renato Cisternas Saldívar¹, Sebastián Espinoza¹, Bastián Herrera¹, Cristopher López¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos #0610, Antofagasta, Chile

Los procesos relacionados a la evolución tectónica de la vertiente occidental de los Andes Centrales continúan siendo motivos de discusión. Un factor clave a considerar en el control de la arquitectura pre-orogénica es la herencia estructural pre-contraccional, influenciada por los procesos de inversión y sus estilos estructurales resultantes, su distribución y la magnitud del acortamiento tectónico acumulado. En la vertiente occidental de la Cordillera de Domeyko se han reconocido estructuras de inversión tectónica positiva de doble-vergencia afectando las secuencias *syn-rift* del Mesozoico y a la cobertura volcano-sedimentaria synorogénica del Cenozoico temprano (Fuentes *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2021; López *et al.*, 2023). La ocurrencia de sistemas de corrimientos, así como la generación de sistemas imbricados, están relacionados a la reactivación de fallas normales pre-existentes (Giambiagi *et al.*, 2005; Amilibia *et al.*, 2008). Los sistemas de corrimientos relacionados a estructuras de inversión representan estilos estructurales ampliamente reconocidos en muchos orógenos activos relacionados a márgenes convergentes; por ejemplo, las cuencas de antepaís argentinas (Giambiagi & Ramos, 2003; Horton & Folguera, 2022), los Alpes Centrales (Pace *et al.*, 2022), entre otros. Los modelos estructurales de piel fina requieren un acortamiento cortical mucho mayor, en comparación a modelos de inversión tectónica de piel gruesa (Coward, 1996; Cristallini & Allmendinger, 2000; Giambiagi *et al.*, 2005). En este trabajo se propone una sección estructural balanceada que describe e interpreta los mecanismos de deformación asociados con estructuras de inversión tectónica positiva (*buttressing*) y sistemas de corrimientos. Las estructuras tipo *buttress* (Butler, 1989; Calamita *et al.*, 2018), observadas en el Cañón del Río Loa, se caracterizan por el grado y estilo de inversión de la cuenca de *syn-rift* mesozoica, acumulando un importante porcentaje de contracción lateral. Para describir la geometría *buttress* se modeló focalmente la deformación de las secuencias de *syn-rift* en una posición de bloque colgante utilizando la metodología de Yakovlev *et al.* (2023). La relación entre la ocurrencia de estructuras tipo *buttress* y sistemas de corrimiento de piel fina en la zona del Cañón del Río Loa, se condiciona a dos elementos arquitecturales: el primero, es que el fallamiento compresional ocurre sobre secuencias synorogénicas del Cretácico Superior al Eoceno, mientras que el segundo, es que gran parte de estos sistemas ocurre en una posición de bloque yacente de las antiguas fallas normales reactivadas. Hemos interpretado que la estructura *buttress* podría tener un comportamiento diacrónico, de manera tal que, la generación de esta estructura podría indicar que los esfuerzos sub-horizontales alcanzaron un valor máximo en las etapas iniciales de inversión. No obstante, el acortamiento se trasladaría hacia el este a través de corrimientos de vergencia este (*pure thrusting*) alcanzando mayores porcentajes de acortamiento.

Palabras Clave: Antearco Andino, Inversión Tectónica Positiva, Buttress, Sistemas de Corrimientos, Acortamiento Tectónico.

Financiamiento: Proyecto VRIDT-UCN2095 Número del Proyecto: 10201251.

Referencias:

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean Mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(12), 1520-1539.
- Butler, R. W. H. (1989). The influence of pre-existing basin structure on thrust system evolution in the Western Alps. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1), 105-122.
- Coward, M. P. (1996). Balancing sections through inverted basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 99(1), 51-77.
- Fuentes, G., Martínez, F., Bascuñan, S., Arriagada, C., & Muñoz, R. (2018). Tectonic architecture of the Tarapacá Basin in the northern Central Andes: New constraints from field and 2D seismic data. *Geosphere*, 14(6), 2430-2446.
- Giambiagi, L., Alvarez, P. P., Bechis, F., & Tunik, M. (2005). Influencia de las estructuras de rift triásico-jurásicas sobre el estilo de deformación en las fajas plegadas y corridas de Aconcagua y Malargüe, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4), 662-671.
- Horton, B. K., & Folguera, A. (2022). Tectonic inheritance and structural styles in the Andean fold-thrust belt and foreland basin. In *Andean Structural Styles* (pp. 3-28). Elsevier.
- López, C., Cisternas, R., Espinoza, S., González, R., Martínez, F., Riquelme, R., ... & Morales, J. (2023). The effects of positive tectonic inversion structures on the formation of thrust systems on the western Domeyko Cordillera, northern Chile: Implications for the orogenic development of the outer Andean forearc. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104376.
- Martínez, F., Fuentes, G., Perroud, S., & Bascuñan, S. (2021). Buried thrust belt front of the western Central Andes of northern Chile: Style, age, and relationship with basement heterogeneities. *Journal of Structural Geology*, 147, 104337.

Zonas triangulares de basamento en la Cordillera Frontal del norte de Chile: Ideas a partir de la Cuenca Lagunillas (28°S)

Lya D. Barraza¹, Fernando Martínez¹

(1) Universidad Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de ingeniería, Campus República, Santiago, Chile

En orógenos dominados por estructuras de basamento es común encontrar fallas inversas y pliegues de escala kilométrica con inclinaciones y vergencias opuestas. La configuración estructural donde dos fallas inversas de basamento se contraponen, puede ser categorizada como una zona triangular de basamento. Esta es una de las características frecuentemente observada en la región centro-sur de la Cuenca Lagunillas, una cuenca intramontañosa ubicada en la Cordillera Frontal del norte a Chile, posicionada sobre el segmento de subducción subhorizontal de los Andes Centrales (Martínez et al., 2015). Estructuras bi-vergentes como las que definen las zonas triangulares de basamento encontradas en esta región, son difíciles de interpretar desde el punto de vista cinemático y temporal. Durante su modelamiento, las preguntas más recurrentes son: a) cómo se desarrollan estas estructuras, ¿b) cuál es la temporalidad de estas?, c) son consecuencia de variaciones geodinámicas, ¿vinculadas al establecimiento de una subducción sub-horizontal? Todas estas interrogantes surgen, dado que su desarrollo no sigue el patrón típico de crecimiento de las fajas plegadas y corridas epidérmicas que siguen la trayectoria horizontal del campo de esfuerzo principal.

Para entender cómo funcionan este tipo de estructuras, se toma como caso de estudio la Cuenca Lagunillas. Este es un laboratorio natural que brinda algunas respuestas a las incertidumbres descritas previamente. El estudio se basó en mapeo geológico (1:100.000), elaboración de cortes estructurales balanceados y su restauración pre-acortamiento. Las principales estructuras de basamento expuestas en la región son, el Anticlinal El Colorado y las fallas Aránguiz y El Potro, respectivamente. Todas ellas, afectan secuencias estratigráficas triásicas y jurásicas vinculadas a depósitos de rift ("syn-rift strata"), y, también secuencias synorogénicas cenozoicas. Basado en observaciones de campo, y, en el modelamiento estructural 2D y 3D de estas estructuras, se ha logrado determinar lo siguiente. Todas ellas parecen haber sido controladas por la reactivación de antiguas heterogeneidades en el basamento. Estas heterogeneidades consisten en antiguas (Triásico-Jurásico) fallas normales antitéticas que controlaron el crecimiento inicial de la Cuenca Lagunillas, en los periodos donde el margen continental de Sudamérica estaba sometido a una extensión generalizada. Además, crearon los espacios para la acumulación de los depósitos triásicos y jurásicos, que hoy en día se encuentran expuestos a lo largo de estructuras contraccionales. La reactivación total y ultra-inversión de estas estructuras sería la responsable del desarrollo de estas estructuras de basamento.

Tal como ha sido observado en otras regiones de los Andes (Rift de Salta, Sierras Pampeanas, Cordillera de Domeyko, etc.; Amilibia et al., 2008; Iaffa et al., 2013; López et al., 2019, entre otros), y, también en modelos análogos y secciones sísmicas (Martínez y Cristallini, 2017; Martínez et al., 2017; López et al., 2022), la posición inicial de fallas normales antitéticas ejerce un fuerte control en el desarrollo de zonas triangulares de basamento, siempre y cuando estas sean reactivadas. La restauración de las secciones construidas en la región de estudio sugiere que, para la creación de este tipo de zonas triangulares, ligadas a la reactivación inversa de antiguas fallas normales, se requiere que estas tengan una configuración inicial divergente en profundidad. Esto último, sería el control primario para la geometría y cinemática de este estilo estructural.

Palabras Clave: Estructuras pre-existentes, Orógenos bi-vergentes, Inversión tectónica, Deformación de piel gruesa.

Agradecimientos: Quisiera agradecer a mi profesor guía el Dr. Fernando Martínez y a los miembros de mi comisión examinadora, el Dr. Reynaldo Charrier y el Dr. Matías Peña.

Referencias:

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean Mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(12), 1520-1539.
- Iaffa, D. N., Sàbat, F., Muñoz, J. A., Mon, R., & Gutierrez, A. A. (2011). The role of inherited structures in a foreland basin evolution. The Metán Basin in NW Argentina. *Journal of Structural Geology*, 33(12), 1816-1828.
- López, C., Del Ventisette, C., Bonini, M., Montanari, D., Maestrelli, D., Martínez, F., et al. (2022). The relationship between inverted normal faults and pure thrusting during the tectonic inversion of the Domeyko Cordillera, northern Chile: Structural and seismic interpretation and analog modeling experiments. *Tectonics*, 41, e2022TC007378.
- López, C., Martínez, F., Maksymowicz, A., Giambiagi, L., & Riquelme, R. (2019). What is the structure of the forearc region in the Central Andes of northern Chile? An approach from field data and 2-D reflection seismic data. *Tectonophysics*, 769, 228187.
- Martínez, F., & Cristallini, E. (2017). The doubly vergent inverted structures in the Mesozoic basins of northern Chile (28° S): A comparative analysis from field data and analogue modeling. *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 327-340.
- Martínez, F., Arriagada, C., Valdivia, R., Deckart, K., & Peña, M. (2015a). Geometry and kinematics of the Andean thick-skinned thrust systems: insights from the Chilean Frontal Cordillera (28–28.5 S), Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 307-324.
- Martínez, F., Gonzalez, R., Bascuñan, S., & Arriagada, C. (2017b). Structural styles of the salar de Punta Negra basin in the preandean depression (24°-25° S) of the central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 87, 188-199.

Desarrollo e inversión tectónica de las cuencas cenozoicas de la Cordillera Principal a los 36°S asociadas a un sistema de fallas con vergencia al oeste

Camila Díaz Bórquez¹, María Pía Rodríguez²⁻³, Reinaldo Charrier González¹⁻², Tania Villaseñor⁴, Juan Pablo Contreras⁵, Ignacio Artigas², Maite Olguín²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

(3) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copiapó, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Regional, Santiago, Chile

Durante el Oligo-Mioceno, bajo un régimen tectónico extensivo, se formaron cuencas de intraarco a lo largo de la Cordillera Principal entre los 29°S y 44°S. Estudios realizados en estas cuencas entre los 32°-35°S han demostrado que los depósitos extensionales mantienen un estilo de deformación característico dominado por fallas normales invertidas con vergencias variables al oeste y al este, dependiendo probablemente de la vergencia de la falla normal original invertida. Al este del límite oriental de las cuencas, donde afloran rocas mesozoicas depositadas en una cuenca de trasarco, la comprensión provocó la inversión tectónica que habría inducido a al desarrollo de una faja plegada y corrida con vergencia al este.

Los principales estudios estructurales realizados en la Cordillera Principal a los 36°S se han concentrado en la zona oriental, donde está expuesto el límite meso-cenozoico, y donde la situación expuesta previamente se mantiene. Allí la intensidad y el estilo de deformación permiten reconocer dos dominios estructurales, (i) uno, en rocas cenozoicas, asociado a la inversión de las cuencas extensionales donde se observa el desarrollo de múltiples pliegues asociados a fallas inversas con vergencia variable, y (ii) otro, al este del anterior, desarrollando en rocas mesozoicas de la cuenca de trasarco, donde las fallas inversas poseen vergencia oriental (Astaburuaga, 2014). Sin embargo, nuevas dataciones radiométricas y estudios estratigráficos han puesto en evidencia que las rocas que antes se consideraban pertenecientes a Fm. Abanico son considerablemente más jóvenes, y que existen rocas cretácicas aflorando muy cerca del límite occidental de la Cordillera Principal. Por otro lado, estudios geoquímicos han demostrado que las rocas básicas de la Fm. Colbún, también correlacionadas con Fm. Abanico, tienen una signatura marcadamente más primitiva. Estos antecedentes permiten considerar que esta región existe un cambio en la configuración geológica, es por esto que, el presente estudio se enfoca en el mapeo geológico-estructural en el sector occidental de la Cordillera Principal.

Resultados preliminares que se obtuvieron durante campañas de terreno realizadas durante el periodo 2022-2023 han permitido identificar una serie de fallas inversas de alto ángulo de rumbo NNE y vergencia al oeste. Además, se han identificado a lo menos dos depocentros cenozoicos que podrían estar asociados al periodo de deformación extensional. El depocentro occidental está formado por sucesiones volcanoclásticas y sedimentarias de edad Oligoceno-Mioceno temprano asignadas a la Fm. Colbún, que presentan un estilo de deformación dominado por las fallas inversas de alto ángulo, las cuales podrían explicar la exhumación de rocas intrusivas del Cretácico Superior, que habrían conformado el basamento de la cuenca. En particular, las evidencias que se presentan para la inversión en este depocentro es la presencia de un sinclinal inmediatamente al este de la falla del borde occidental de la Cordillera Principal. El depocentro oriental estaría asociado a sucesiones volcanoclásticas de edad Mioceno temprano a medio. En la zona de transición entre los dos depocentros la deformación es más intensa y presenta características de inversión tectónica. En ese sector, existe una falla inversa de alto ángulo con vergencia al oeste que produjo un apretado sinclinal de arrastre con su flanco oriental volcado y con evidencias de *flexural slip*. Al este de esta falla, existe un bloque alzado de rocas volcanoclásticas de edad Oligoceno temprano, donde domina la deformación frágil asociada a las fallas que lo limitan. Al este de este bloque se reconoció una falla inversa de alto ángulo con vergencia al este que produjo un fuerte arrastre e incluso inversión en capas volcánicas y volcanoclásticas de edad miocena, además, hacia el oriente se observan una serie de pliegues de longitud de onda variable, similar al dominio (i) descrito por Astaburuaga (2014).

La presencia de rocas plutónicas cretácicas que corresponderían al basamento de los depósitos acumulados en el depocentro occidental y la identificación de estas fallas sugiere que la deformación extensional se prolongó hasta, por lo menos, el Mioceno medio en estas latitudes, y que existieron, a continuación de un evento de exhumación post-cretácico, al menos, tres etapas de desarrollo extensional de intraarco: (i) la apertura de la cuenca y deposición de la base durante el Oligoceno temprano abarcando tanto el sector occidental como el oriental, (ii) subsidencia y deposición durante el Oligoceno-Mioceno temprano en el sector occidental y (iii) subsidencia y deposición durante el Mioceno temprano a medio en el sector oriental.

Palabras Clave: cuencas cenozoicas, tectónica, Andes del sur.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por FONDECYT (proyecto #1210475).

Referencias:

- Astaburuaga, D. (2014). Evolución estructural del límite mesozoico-cenozoico de la Cordillera Principal entre 35°30' y 36°S, Región del Maule, Chile (Tesis de Magíster). Universidad de Chile, Santiago, 140 p.

Analysis and structural restoration of the Abanico Formation, Principal Cordillera of central Chile, between 33°40' – 34°20'S (Maipo and Cachapoal river valleys)

Alfredo Díaz Pereira¹, Reynaldo Charrier González¹⁻², Felipe Tapia Silva³, Matías Villarroel Lastra⁴

(1) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Avda. República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Int. Güiraldes 2160 (C1428EGA), Buenos Aires, Argentina

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

1. Introduction

In the Principal Cordillera of central Chile there are few quantitative structural analyses that continuously and completely cross over the western Principal Cordillera and, simultaneously, displays values of tectonic shortening with models of the geometry of structures toward deeper levels. The knowledge of the percentage of tectonic shortening and the geometry of the surface structures would help to understand the deformation that gave rise to the uplift and current configuration of the Principal Cordillera, and also, to establish hypotheses about the internal architecture of the Abanico extensional basin (Charrier et al., 2002). There are a large number of structural sections and the evaluation of the structures that compose them, by remote sensing methods and by the contribution of new data for specific zones, allow their integration into continuous sections that completely cover the area of the western Principal Cordillera in the study region.

In this publication, we present the preliminary results obtained for two structural models of 50 km long cross sections that encompass the Principal Cordillera and extend from the eastern edge of the Central Depression to the El Diablo fault system, which separates the Cenozoic sequences from the Mesozoic in this region. The first model is based on 3 sections oriented at 95° azimuth, within an east-west strip between 33°47' and 33°53'S, and the second model based on 3 sections oriented at 105° azimuth within the strip between 34°12' y 34°26'S.

The orientation of the principal structures and the parameters that define them were obtained from the generated structural models, from the calculation of the minimum crustal shortening value and from the combination of these data with the location of seismic hypocenters within the study area. Finally, high-angle deep structures were identified, which would constitute master faults that delimit the compartments of the Abanico basin for depth levels up to 2500 m.

2. Tectonic and geological settings

In the study region, the Principal Cordillera has been categorized as a double-vergent orogen (Fock et al., 2006; Armijo et al., 2010; Fariás et al., 2010), displaying faults and folds with predominant vergence to the west on the western edge of the Principal Cordillera and an eastern vergence to the east of the El Diablo fault system, where a fold-thrust belt develops.

The Cenozoic deposits, which constitute most of the stratified sequences of the western Principal Cordillera, would have accumulated from the Upper Eocene in an intra-arc extensional basin (Abanico basin) that would have inverted tectonically in the Miocene (Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002; Fock et al., 2006; Fariás et al., 2010).

As a generalization, for the Principal Cordillera in Chile, the stratified units are arranged in N-S orientation strips arranged on both sides of the El Diablo fault system, recognized between 29° and 37° S (Fock et al., 2006). The western fringe, studied area of this work, is mainly composed of powerful continental volcanic successions of Cenozoic age, belonging to the Abanico and Farellones formations. The eastern one, on the other hand, is made up of Mesozoic sedimentary units deposited on the northwestern edge of the Neuquén back arc basin, accumulated during two transgression-regression cycles.

At the studied region, the Principal Cordillera between 33°30' and 34°15'S, the deformation on the Cenozoic successions and, in particular, the Abanico Formation, is characterized by presenting large structures with subparallel orientations and with variable strike tending N-S direction. The extension of these structures varies from >10 km, considered first order, to local structures with kilometric to hectometric latitudinal extension. At the latitude of the Maipo river valley, the preferential strike orientation of the structures is N-S, grading slightly towards NNW-SSE or NNE-SSW with important variations in deformation style and vergence. At the latitude of the Cachapoal river valley, the structures are preferentially oriented with a strike of N10°-15°E, presenting, as in the Maipo river sector, significant variations in deformation style and vergence.

3. Methodology

The sections were constructed based on the characterization of the superficial geology, attained from data obtained in field campaigns, by remote sensing analysis and by compilation of structural sections elaborated by other authors. The extrapolation towards subsurface levels was achieved by balancing the sections maintaining constant line length. The precepts used for the construction of both sections are based on the work of Woodward et al. (1989, and references cited in the text) and Allmendinger.

The structural modeling was accomplished using the software Andino3D (Cristallini et al., 2022). The procedure is summarized in the construction of a first model of kink-type geometry that was then fitted to geometric models of kink band migration for folds related to faults (detail of these models on Woodward et al., 1989). It was also modeled with the Trishear equations (Allmendinger, 1998) in order to characterize the faults involved in the generation of more complex structures, although the final geometry was drawn in kink bands to keep the section line length constant.

In order to determine floors of the same age, the following was carried out: (i) a characterization of the deformation geometry based on data acquired *in situ*, remote sensing analysis and bibliographic compilation, and (ii) construction of a database with geochronological ages (U-Pb, K-Ar, Ar-Ar) collected from other works and sampled within the study area.

Using a single regional level and regional dip for the Principal Cordillera is ambiguous if the purpose is making a balanced cross section. This is due the fact that both, the foreland and the hinterland, are tilted towards the orogen, without knowing how much of this dip is related to: (i) flexure due to lithostatic load (of the Principal Cordillera), (ii) structures linked to the development of the Abanico basin western edge, or (iii) with the development of the Aconcagua fold-thrust belt, at the eastern side of the El Diablo fault system.

In addition, after the extensional phase, the paleo-relief could be variable in different depocenters of the basin, generating different local regional elevations. For this work, local reference levels were used for each zone so that the balancing procedure was carried out by blocks that were joined later. The error value calculated after stretching the layers was determined individually for each block and then for the complete cross sections, so that it does not exceed 10%.

4. Results

The preliminary results obtained are summarized in Figure 1, where the final model and sub superficial interpretation of structures are shown. The structures were fitted in models of fault propagation folds and fault bend folds, generating structures as asymmetric folds, monoclines, translated and/or rotated blocks by fault movements, imbricate fan systems, duplex systems and inversion structures.

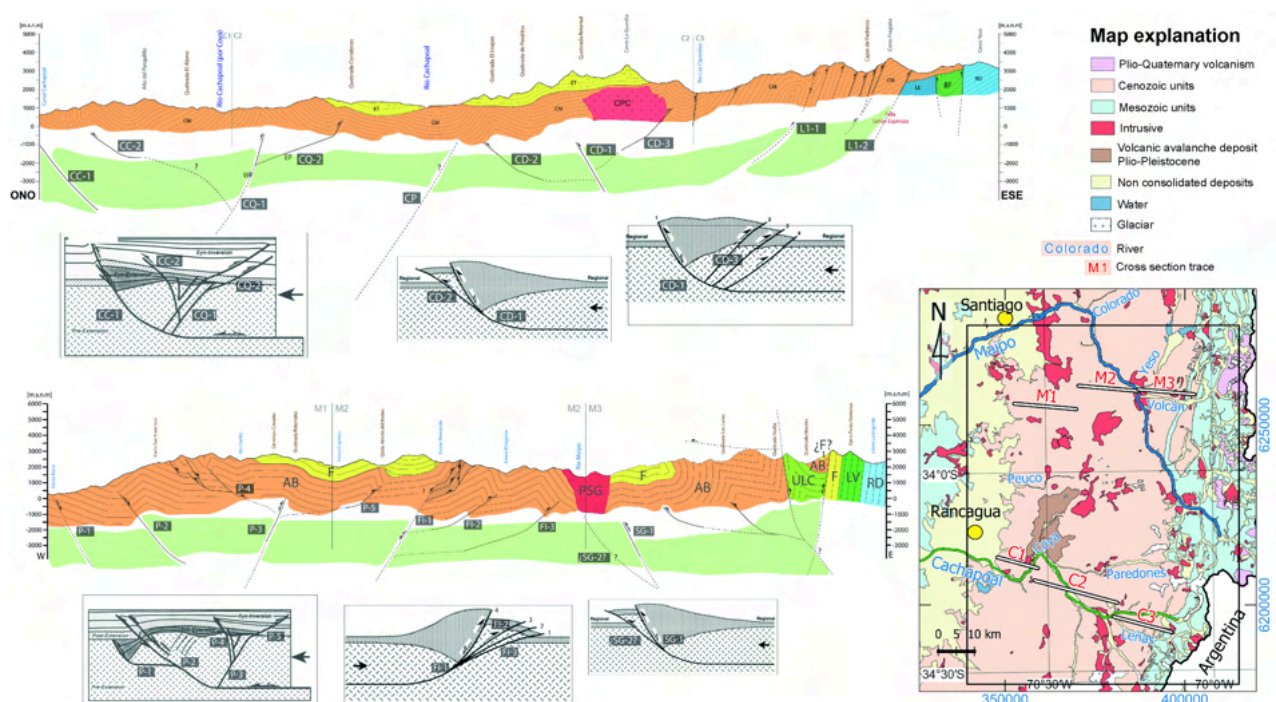


Figura 1: Preliminary results of the superficial structural modeling. Upper profile from the Cachapoal river valley and lower profile from the Maipo river Valley. The boxes below the profiles are schematics of analog modeling structural systems obtained from experiments in McClay (1995) and there are placed for comparison with the geometry obtained in this work. Symbology for profiles: (i) Cenozoic units, F: Farellones Fm., ET: El Teniente Volcanic Complex; AB: Abanico Fm., CM: Coya Machalí Fm.; (ii) Mesozoic units, ULC: Las Coloradas Unit; LV: Lo Valdés Fm.; BF: Baños del Flaco Fm.; RD: Rio Damas Fm.; LE: Leñas-Espinoza Fm.; (iii) Intrusive units, PSG: San Gabriel Pluton; CPC: Cortaderal Plutonic Complex. For this work, the Farellones with CV El Teniente, Abanico with Coya-Machalí and Lo Valdés with Baños del Flaco formations were considered as lithostratigraphic equivalents.

The kind of fault related fold was determined, for each case, based on a series of criteria: (i) geometric relationships of the axial surface and fold limbs that correctly fit the parameters of well proved geometric-kinematic models, (ii) greater inclination and lesser length of the frontal limb in fault propagation folds, (iii) length and inclination of the back limb, (iv) growth structures reported in or close to the profile trace, (v) larger regional structures located in the proximity of the profile trace, and (vi) comparison with seismicity data collected and summarized in previous works (Armijo et al., 2010; Farias et al., 2010). For each criterion described, if we make an isolated analysis, there are exceptions or variants to the generalization, so that the evaluation was carried out considering simultaneously all these criteria for each structure and not based on just one.

The interpretations assumed the development of an intra-arc basin, which deposits would have accumulated from the upper Eocene and would have been tectonically inverted in the lower Miocene, a situation that is justified based on abundant sedimentological, structural, geochemical, geochronological and geophysical evidence (Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002, and references cited in those texts). Also, this basin has an architecture developed on a crust with structures inherited from previous tectonic phases.

5. Discussion

Crustal shortening and structural style.

The total crustal minimum shortening calculated for latitude $\sim 33.50^{\circ}\text{S}$ (Maipo river valley) is 19.5 km, while for latitude $\sim 34.10^{\circ}\text{S}$ (Cachapoal river valley) it is 17.1 km.

Regarding the distribution of shortening, various observations can be made:

- (i) The minimum shortening value is heterogeneously distributed and is concentrated around (not by) high angle structures. The structures that cause the greatest shortening are reverse faults with an average cutting angle of 30° - 35° .
- (ii) The segments located between the high deformed zones are characterized by developing homoclinal geometries with dips with values between 5° and 10° , and that usually constitute limbs of monoclines, synclines with interlimb angles greater than 160° or the back limbs of anticlines.
- (iii) The high-angle structures located at the basin edges (Abanico basin) cause greater folding in the hanging wall block compared with the high-angle structures located in central zones, which has a role as nucleus zones at which root complex systems of faults with dips $<35^{\circ}$, capable of generating, locally, high values of shortening.
- (iv) After the restoration, two sets of compressive phase faults were identified: (a) faults rotated between 5° to 10° , that nucleates toward high-angle structures and developed essentially at greater depths >1 km and (b) faults rotated $<5^{\circ}$ located at superficial levels (<1 km) and nucleating into high-angle structures or in structures defined in (a).

Surface architecture of the Abanico basin

The modelling of structures has allowed the elaboration of a proposal of the orientation and depth of the faults that generate the outcropping folds. The geometric arrangement was compared with structural configurations for positive tectonic inversion systems obtained by analogic modelling, generating a model of the surface architecture of the basin. The proposal made here is superficial and is valid only for maximum depths between 2000 m and 2500 m.

Accuracy and limitations of the model

This model allows visualizing the geometry of the deformation at surface levels no greater than about 2500 m. Its validity does not affect that of regional architecture models that shape the Andean Orogen (e.g. Armijo et al., 2010; Farias et al., 2010) and is oriented, rather, to contribute with new data to the characterization of the superficial structural style, both qualitatively and quantitatively.

There is always the possibility that structures that do not fit into theoretical models may form in areas below the surface. Furthermore, the theories of fold formation related to faults based on parallel slip between layers correspond to a geometric and kinematic description, without foundation in the mechanical behavior of the rock (Woodward et al., 1989), therefore, heterogeneities between different layers, such as the alternation of lithological types, wedging or mechanical anisotropies can locally cause notoriously different results in the predictions of these models. Anyway, the model presented here has the purpose of identifying the principal structures that controlled the basin development and a minimum value of shortening, so, more precisely models require work at major scales and even different structural modelling approaches as they can consider secondary order structures as fold accommodation faults.

6. Conclusions

The high value of minimal shortening concentrated around the master structure of the eastern edge of the Abanico basin, higher than those recorded on the western edge, makes visible its first-order importance in the inversion phase. This, together with the identification of deeper depocenters in the eastern sector of the Principal Cordillera, compared to its western sector (Fock et al., 2006), reveals that the regional fault system that separates the Cenozoic from the Mesozoic sequences at the Principal Cordillera is a first-order structure, at least during the entire development phase of the Abanico basin (Upper Eocene – Lower Miocene).

Based on the projection toward the subsurface of the emerged faults and the blind faults that generated the folds of the deformed system of the Abanico Basin, structural configurations geometrically similar to those obtained by analogous modeling experiments were identified. Principally the structures identified are: simple listric fault systems and double-listric ramp composed fault systems, with the development of collapse grabens, hanging wall shortcut fault structures and footwall bypass faults, these structures are compared with those presented in the works of McClay (1995).

Based on the preliminary results of this work, it is proposed that the surface architecture of the Abanico basin, for $\sim 33^{\circ}50'\text{S}$ and $\sim 34^{\circ}15'\text{S}$, is dominated by a symmetrical extension system, with the development of a raised block in the central segment, shorter in length at the Maipo sector compared to the Cachapoal.

Keywords: Abanico basin, balanced cross section, crustal shortening, tectonic inversion

Financing: This research is part of the Fondecyt #1210475 project, led by Reynaldo Charrier.

Acknowledgments: Acknowledgments The authors thank LA.TE. ANDES and Ernesto Cristallini for their kindness in facilitating the software Andino3D and Felipe Moreno González for his valuable assistance in field work.

References:

- Allmendinger, R., (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds: *Tectonics*, v. 17(4), p. 640-656.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., Kausel, E., (2010). The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, Vol. 29. TC2007.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A., Zurita, E., (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 15, pp. 117-139.
- Cristallini, E., Hernández, R., Balcunas, D., Nigro, J., Dellmans, M., Costilla, M. (2022). Andino 3D: software de modelado estructural (Versión 2.0.1.2). LATE ANDES. Disponible en <http://www.andino3d.com.ar/>.
- Farias, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., Claire, D., Tassara, A., Tapia, F., Fock, A., (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean Mountain building. *Tectonics*, vol. 29.
- Fock A., Charrier R., Farias M., Muñoz M., (2006). Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°-34° S). *Asociación Geológica Argentina, Serie: publicación Especial N° 6*, pp. 4855.
- Godoy E., Yáñez G., Vera E., (1999). Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: First seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, v. 306, p. 217-236.
- McClay, K., (1995). The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue model studies. *Geological Society Special Publication No. 88*, 97-118.
- Woodward, N., Boyer, S., Suppe, J. (1989). *Balanced Geological Cross-Sections: An essential technique in geological research and exploration* (1st ed., Vol. 6). American Geophysical Union.

Structural Evolution of the Western Andean Slope in Central Chile (36°S) from Geology, Geophysics and Geochronology

Mauricio Espinoza Vargas¹⁻⁵, Juan Pablo Contreras², Andrei Maksymowicz³, Joaquín Cortés-Aranda¹⁻⁵, Eduardo Vargas¹, Julie Fosdick⁴, Megan Mueller⁴, Andrés Tassara¹, Camila Rivera¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290. Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Sta. María #0104, Providencia, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(4) University of Connecticut, Department of Earth Sciences, 354 Mansfield Road, U-1045, Storrs, CT 06269, Connecticut, United States of America

(5) Millennium Nucleus the Seismic Cycle Along Subduction Zones, Valdivia, Chile

The Andean orogen has been classically interpreted as formed by a crustal-scale eastward retro-wedge (Fariás et al. 2010; Giambiagi et al. 2014). The recognition of an active, west-vergent thrust system (WTS) at its western slope has raised controversial interpretations regarding the development of an active west-vergent fold-thrust belt (Armijo et al. 2010). Furthermore, the transition between the WTS and the well-developed east-vergent fold-thrust belt remains poorly constrained. Here we analyze the structure of the western Andean slope at 36°S, to shed light onto the transition mechanism between west- and east-vergent thrust systems and the control of the ancient extensional architecture of the Abanico basin in the mountain building process. We present structural, gravimetric, U-Pb geochronology, and low-temperature thermochronology data (U-Th/He dating).

Based on field mapping and gravimetric surveys we interpret two major NE-striking, west-vergent, inverse faults as part of the WTS (Mesamávida and Ancoa faults). The Mesamávida fault is an active structure at the mountain front capable of producing Mw 6.1-6.7 earthquakes (Cortés-Aranda; this conference). Located to the east of the Mesamávida fault, the Ancoa fault delimits two major structural domains. To its west, Miocene volcanosedimentary rocks from the Colbún Fm. (Vergara et al. 1999) correlated to the Abanico Fm. overlies in unconformity Cretaceous plutons that yielded ca. 86 Ma U-Pb ages (Vegas de Ancoa pluton; Contreras et al. in prep), forming a wide syncline bounded to the west by the Mesamávida fault. U-Pb detrital ages from this upper member of the Colbún Fm. yielded a maximum depositional at ca. 20 Ma and displayed a main peak of Cretaceous sources (ca. 86 Ma), with secondary Oligocene (ca. 34 Ma) and Miocene peaks (19 Ma). To the east of the Ancoa fault, a highly uplifted central block is formed by the Oligocene volcanic sequences of the lower member of the Colbún Fm. showing extensional synsedimentary faulting (U-Pb age at ca. 30 Ma), Cretaceous plutonic rocks (Spikings et al. 2008), and volcanosedimentary rocks assigned preliminarily to the Las Chilcas Fm. (U-Pb age at ca. 113 Ma). At the eastern margin of this block, the east-vergent Las Zorras fault thrusts the lower member of the Colbún Fm. and Miocene plutons (ca. 18-14 Ma; Spikings et al. 2008) over a younger volcanosedimentary Miocene unit (Curmallin Fm., Contreras et al. in prep). At the western block, U-Th/He data from the Vegas de Ancoa Cretaceous pluton suggest a continuous exhumation event during the Oligocene, likely related to the extensional aperture of the lower member of the Colbún Fm., later heating due to burial during the extensional development of the upper member Colbún Fm. and subsequent cooling during the upper Miocene (ca. 18-16 Ma), likely related to the inversion and consequent uplift of the Colbún depocenter of the Abanico basin.

Based on a published thermomechanical model (Giambiagi et al. 2022), we suggest that west-vergent structures (Ancoa and Mesamávida faults) would occur at the ramp domain of a crustal detachment, representing large-scale backthrusts related to the east-vergent fold-thrust belt. The Ancoa fault would represent an ancient structure, likely related to the inversion of the Abanico basin master faults. This fault, as well as the Mesamávida Fault, seems to display neotectonic activity, based on morphometric analysis and the location of Pleistocene subvolcanic centers. The recent activity of both Mesamávida and Ancoa faults can possibly be associated with the slip of the western structural blocks over the crustal ramp, though alternative hypotheses need to be considered.

Keywords: Abanico basin, U-Th/He, basin inversion, U-Pb, gravimetry.

Financing: Fondecyt Postdoctorado 3200348 (ANID).

References:

- Armijo, Rolando, Rodrigo Rauld, Ricardo Thiele, Gabriel Vargas, Jaime Campos, Robin Lacassin, Edgar Kausel. 2010. "The West Andean Thrust (WAT), the San Ramón Fault and the Seismic Hazard for Santiago (Chile)." *Tectonics* 29 (TC2007), 1-34.
- Cortés Aranda, J., Aguilera, R., Arriagada, D., Sepúlveda, T., Vega, A., Melnick, D., Tassara, A., Riedel, M., Luppi, M., Espinoza, M. 2023. The Mesamávida Fault: a seismogenic fault in the Western Andean Front (WAF), Central Chile (~36°S). XVI Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile.
- Fariás, Marcelo, D. Comte, R. Charrier, and J. Martinod. 2010. "Crustal-Scale Structural Architecture of the Central Chile Andes Based on 3D Seismic Tomography, Seismicity, and Surface Geology: Implications for Mountain Building in." *Tectonics*, 57-78.
- Giambiagi, Laura, Andrés Tassara, Andrés Echaurren, Joaquín Julve, Rodrigo Quiroga, Matías Barrionuevo, Sibiao Liu, et al. 2022. "Crustal Anatomy and Evolution of a Subduction-Related Orogenic System: Insights from the Southern Central Andes (22-35°S)." *Earth-Science Reviews* 232 (104138): 104138.
- Giambiagi, L., J. Mescua, N. Heredia, P. Fariás, J. García-Sansegundo, C. Fernández, S. Stier, et al. 2014. "Reactivation of Paleozoic Structures during Cenozoic Deformation in the Cordón Del Plata and Southern Precordillera Ranges (Mendoza, Argentina)." *Journal of Iberian Geology* 40 (2). https://doi.org/10.5209/rev_jige.2014.v40.n2.45302.
- Spikings, R., M. Dungan, J. Foeken, A. Carter, L. Page, and F. Stuart. 2008. "Tectonic Response of the Central Chilean Margin (35-38°S) to the Collision and Subduction of Heterogeneous Oceanic Crust: A Thermochronological Study." *Journal of the Geological Society* 165 (5): 941-53.
- Vergara, Mario, Diego Morata, Rosemary Hickey-Vargas, Leopoldo López-Escobar and Ingrid Beccar. 1999. "Cenozoic Tholeiitic Volcanism in the Colbún Area, Linares Precordillera, Central Chile (35°35'-36°S)." *Revista Geológica de Chile* 26 (1), 23-41.

Anisotropía de susceptibilidad magnética a lo largo de las cuencas de los ríos Maule y Tinguiririca

Iván Andrés Gómez Schulz¹, Marcelo Farías¹

(1) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

En los Andes del sur, la orogenia Incaica, o su equivalente, fue seguida, en el Eoceno - Mioceno temprano, por un evento extensional, asociado a rollback (Mpodozis y Cornejo, 2012), adelgazamiento cortical asociado a la Formación Abanico y sus equivalentes Fm. Coya-Machalí, Fm. Cura-Mallín, y Fm. Colbún.

En el Oligoceno - Mioceno, la cuenca extensional de Abanico se invierte, asociado al aumento de la tasa de convergencia entre las placas (Pardo-Casas y Molnar, 1987, Somoza, 1998). El inicio de la deformación en la vertiente oeste está marcada por las variaciones geoquímicas, desde una Formación Abanico Toleítica baja en potasio a dacitas calco-alcalinas del Complejo Volcánico Teniente (Kay et al., 2006), a los 21-19 Ma (Charrier et al., 2002, 2005). Las Formaciones Farellones, Collon Cura, Trapa-Trapa, Estratos del Colorado y los depósitos de la cuenca Alto Tunuyán representan los depósitos sinorogénicos y se apoyan en discordancia por sobre Fm. Abanico y equivalentes.

En Chile central, esta deformación, podría estar asociada a la apertura y posterior cierre de la cuenca de Abanico (Formación Abanico y las equivalentes Formación Coya-Machalí, Formación Cura-Mallín y Formación Colbún). Los depósitos volcánicos de la cuenca de intra-arco de Abanico, asociada a adelgazamiento cortical, alto flujo calórico y magmatismo de afinidad toleítica representan un episodio de extensión regional. Los depósitos en estas unidades más antiguos datados hasta el momento tienen una edad de $43,0 \pm 0,4$ Ma en el Cordón de los Ratones (Sellés y Gana, 2001), justo por encima de la discordancia Incaica. Entre los 32° y 36° S la extensión se concentró, de oeste a este en: Falla Los Angeles - Infiernillo - Portezuelo Chada, manteando al este; Falla Pocuro - San Ramón, manteando al este; Falla El Diablo - Las Leñas - El Fierro, manteando al oeste (Fock et al, 2006, Farías et al, 2008). Aunque el desarrollo de la deformación no se observa de manera constante a lo largo de la cuenca. A los $\sim 33^\circ$ se proponen dos depocentros, aún cuando el basamento no se observa. A los $\sim 35^\circ$ las unidades en la base se han reconocido como el arco del cretácico tardío. Incluso más al sur, a los $\sim 36^\circ$, la cuenca se encuentra separada por plutones de edad cretácica tardía. Hacia el sur la cuenca habría experimentado un mayor desarrollo de los procesos de exhumación y adelgazamiento cortical (Charrier et al., 2018).

Este trabajo intenta dar interpretación a datos de anisotropía de susceptibilidad magnética recolectados a lo largo de los ríos Maule, Teno y Tinguiririca.

Las fábricas estudiadas, especialmente en rocas clásticas, pueden estar asociadas a procesos de carácter tectónico o depositacionales.

Palabras Clave: abanico, ams, andes del sur.

Tectonoestratigrafía de unidades meso-cenozoicas en el sector del Valle de Alicahue, borde occidental de los Andes Centrales del Sur (32°20'S): Nuevos hallazgos estructurales y geocronológicos

Manuel González Candia¹, Pamela Paz Jara Muñoz², Luisa Pinto Lincoñir¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla #803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins #3363, Santiago, Chile

Los Andes Centrales del Sur, a pesar de ser una cadena montañosa continua sobre el margen occidental de Sudamérica, presenta variaciones latitudinales que permiten subdividirla en 4 segmentos (e.g., Yáñez et al., 2001). En el contexto de la "Segmentación Andina", la región de estudio se sitúa entre dos de estos segmentos: subducción normal entre los 33° y 46°S, y subducción subhorizontal de la placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana entre los 27° y 32°S, con un ancho ~400 km, y que se ha asociado a la subducción del *ridge* de Juan Fernández (Yáñez et al., 2001). La zona de transición entre ambos segmentos (32° y 33,5°S) presenta una deformación EW-WNW y marca un cambio en la configuración de las unidades morfoestructurales. Al sur de los 33°S se distinguen 3 rasgos: Cordillera de la Costa (CC), Depresión Central (DC) y Cordillera Principal (CP), mientras que al norte de los 33°S la DC no está presente y el límite entre CC y CP es difuso (Yáñez et al., 2001; Charrier et al., 2007). En esta última zona de transición, destacan dos sistemas estructurales principales, de oeste a este: La Falla Infiernillo (Fock et al., 2006) y la Zona de Falla Pocuro (ZFP, Rivano et al., 1993) cuyos límites y relación cronológica siguen en discusión (e.g., Jara y Charrier, 2014; Pérez-Sánchez, este congreso). Según Rivano et al. (1993), la ZFP es una megaestructura de ~100 km de largo con un ancho variable entre 500 m y 2 km, con un ancho máximo de 6 km en el sector del Estero San Francisco (Urrejola-Sanhueza, 2022). Esta megaestructura es inversa con vergencia hacia el oeste (Estay, 2019), y correspondería a una megafalla normal invertida (Fock et al., 2006).

En la región de estudio, ubicada en el Valle Alicahue (32°20'S), al oeste de la ZFP, existen incertezas sobre la relación de contacto entre las unidades mesozoicas y cenozoicas, y la deformación que les ha afectado. Esto se debe a la ubicación del borde de la Cordillera Principal en este segmento, ya que más al sur la ZFP podría marcar el borde occidental de la CP (Urrejola-Sanchez, 2019; Estay, 2019), pero el frente de montaña de la CP se encuentra ligeramente desplazado hacia el oeste solapándose con la CC en esta región. Dado lo anterior, se realiza un estudio estratigráfico, estructural y dataciones geocronológicas (U-Pb en circones) para definir las unidades, comprender su deformación y determinar las implicancias para el desarrollo de la Cordillera Principal a estas latitudes.

Los resultados preliminares de geocronología han permitido evidenciar la presencia de unidades cenozoicas al oeste de la ZFP a esta latitud, lo que había sido planteado pero no probado en trabajos anteriores (e.g., Jara y Charrier, 2014). Con este estudio se confirma la presencia de rocas de la Formación Abanico sobreyaciendo a la Formación Las Chilcas. Adicionalmente, el análisis estructural inicial indica la presencia de dos sistemas de estructuras. Uno de ellos consiste en un par de pliegues sinclinal y anticlinal con eje N-S que reflejaría un acortamiento ~E-W afectando a las unidades mesozoicas, que podría marcar el borde occidental de la Cordillera Principal a estas latitudes. El otro sistema estructural corresponde a un pliegue monoclinal de eje ~E-W de escala regional que muestra un acortamiento ~N-S. Este último genera que en la parte norte el contacto entre las formaciones Cerro Morado y Las Chilcas, esté a mayor altitud con respecto al sector sur (~600 m).

Palabras Clave: Zona de Falla Pocuro, Dataciones U-Pb, Meso-Cenozoico, Tectonoestratigrafía andina

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: A J. Estay, A. Jackson-Gain, A. Beeche y al arriero W. Briceño quienes apoyaron las campañas de terreno.

Referencias:

- Arias, L., 2019. La Formación Las Chilcas en el valle del estero Los Ángeles (32°31'), Chile Central: Evolución sedimentaria y estratigráfica e implicancias paleogeográficas durante el cretácico. Tesis de Magíster en Ciencias, Universidad de Chile, Departamento de Geología, pp.1-172.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), The Geology of Chile. Geological Society of London, vol. 1, pp. 21-114.
- Estay, J., 2019. Tectónica activa en el borde Occidental de la Cordillera Principal de Chile Central (29°-36°S). Tesis de Magíster (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, pp. 1-120.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M., Muñoz, M., 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33-34 S). Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial, vol. 6, pp. 48-55.
- Jara, P., Charrier, R., 2014. Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: implicancias paleogeográficas y estructurales. Andean Geol. 41 (1), pp. 174-209.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., Espíñeira, D., 1993. Hoja Quillota y Portillo. V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 73, 1 mapa escala 1:250.000.
- Urrejola-Sanhueza, J.T.G., 2022. Análisis estructural mediante magnetotelúrica del sistema de fallas Pocuro entre el Estero San Francisco y el río Aconcagua, V Región. Tesis de Pregrado (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, pp. 1-66.
- Yáñez, G., Ranero, C., von Huene, R., Díaz, J., 2001. Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32–34 S): The role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 106(B4).

Pre-Andean deformation and its influence on the shortening of the Southern Precordillera, Mendoza, Argentina

Milagros Gutiérrez Seia¹, Laura Giambiagi², Pamela Paz Jara Muñoz³

(1) Universidad Del Desarrollo, Carrera de Geología, Las Condes, Santiago, Chile

(2) University of Santiago of Chile (USACH), Mining Engineering Department Faculty of Engineering, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Estacion Central, Santiago, Chile

(3) IANIGLA-CONICET, Grupo de Tectónica, Parque San Martín S/n, Mendoza, Argentina

Introduction

Particularly, the Southern Precordillera, in the southern Central Andes, presents a combination of different structural domains and a double vergence related to the reactivation of pre-Andean structures (Cortés et al., 2006; Giambiagi et al., 2010). This combination and the superposition of deformational events make it difficult to understand the stratigraphic systems and the region's evolution. This contribution presents detailed information about the structures and growth of the Southern sector of the Precordillera, focusing on the control exerted by Paleozoic structures over the recent Andean deformation, and the deformational styles of this fold-and-thrust belt.

The stratigraphy of the study area is represented by Precambrian and Lower Paleozoic metamorphic and sedimentary rocks; late Permian-early Triassic volcanic and volcanoclastic rocks, Triassic clastic sequences associated with the Cuyo basin deposits; and Cenozoic foreland sequences. At 32 ° 30' S, Southern Precordillera is divided into two structural domains: Western and Eastern (Giambiagi et al., 2010), which are tectonically bounded by the Villavicencio fault. The western domain is characterized by north-south to north-northeast trending faults with tectonic transport towards the west (Giambiagi et al., 2014). The eastern domain is characterized by north-south and northeast-trending double-vergence faults and northwest and east-west Triassic faults of normal dextral kinematics.

Results

According to a recent contribution in this context (Gutiérrez et al., 2023), based on the study of surface information, three structural domains can be distinguished at this latitude: Western, Central, and Eastern. These domains are characterized by three basement blocks overlaid by Triassic deposits filling the sub-basin Las Peñas, which forms a half-graben limited by the Las Higueras fault. This depocenter is uplifted by the regional reverse faults: Tontal, Peñasco, Villavicencio (cover), Manantiales, and Santa Clara faults.

These domains are affected by structures where four deformational events are recorded. Paleozoic structures affecting the Southern Precordillera can be associated with two pre-Devonian compressive pulses. The kinematic of the mapped structures establishes that the last Palaeozoic compression entails synchronous contractional and strike-slip events, under a transpressive regime, with a general north-south maximum shortening axis and double tectonic transport. After these events, a contractional northeast shortening pulse affected rocks in the study area. This brittle deformation also presents a transpressive component. These Palaeozoic structures control the position of west-vergent Andean thrusts. Triassic deformation is recorded by fault-slip data, collected from continental sequences, indicating a homogenous orientation of northeast maximum stretching direction. Finally, the maximum shortening axis for the Early Miocene deformation can be associated with Andean tectonics and can be characterized by north-northeast and north-northwest faults with tectonic transport towards the east. To characterize this last pulse of deformation our model for the Cenozoic deformation starts from an area-balanced section and is restricted to three stages of deformation (Gutiérrez et al., 2023). Paleozoic west-verging faults are reactivated during the first stage (15 - 8.5 Ma), generating a minimum shortening rate of 0.72 mm/yr. The second stage (8.5 - 3.5 Ma) implies the reactivation of Palaeozoic and Permian-Triassic structures and the generation of reverse Andean faults, presenting a minimum shortening rate of 1.04 mm/yr; concentrating the highest rate of shortening for the Southern Precordillera FBT. The final stage (3.5 - 0 Ma) consists of the generation of NE-SW Andean thrusts, and is characterized by a strong shortening and mostly thin-skinned deformation; with a minimum shortening rate of 0.86 mm/yr.

The field data, the kinematic analysis, and the structural model suggest that the deformation of the Southern Precordillera at 32 ° 30' S has been strongly influenced by Palaeozoic to Triassic pre-Andean structures. Here, we propose that the reactivation of Palaeozoic north-northeast structures and Permian-Triassic north-northwest structures, as reverse and strike-slip faults, respectively, are responsible for the thick deformational style of this fold-and-thrust system. Mesozoic normal faults, associated with master faults of the Cuyo basin, have been reactivated under the positive tectonic inversion. These faults have north-northwest to northwest variable orientation and can be reactivated as high-angle reverse faults with a sinistral component. For a more detailed understanding of this geological framework, refer to Gutiérrez et al., 2023.

Keywords: Precordillera, Fold-and-thrust belt, Paleozoic reactivation, Kinematic analysis, Forward modelling.

Acknowledgments: This work was supported by the Argentine ANPCyT (PICT-2019- 0800) and the Argentine CONICET (PIP 11220200101409CO).

References:

- Gutiérrez Seia, M., Jara, P., Bertoa del Llano, M., Richard, A., Lothari, L., & Giambiagi, L. B. (2023). Pre-Andean deformation and its influence on the shortening of the Southern Precordillera, Mendoza, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104322. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104322>.
- Cortés, J.M., Casa, A., Pasini, M., Yamin, M.Y., Terrizzano, C., 2006. Fajas oblicuas de deformación neotectónica en Precordillera y Cordillera Frontal (31 ° 30' - 33 ° 30' S): controles paleotectónicos. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 61, 639–646.
- Giambiagi, L.B., Mescua, J., Folguera, A., Martínez, A., 2010. Estructuras y cinemática de las deformaciones pre-andinas del sector sur de la Precordillera, Mendoza. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 66, 5–20.
- Giambiagi, L.B., Mescua, J., Heredia Carballo, N., Fariás Arquer, P.J., GarcíaSansegundo, J., Fernández, C.Y., Lössada, A., 2014. Reactivation of Paleozoic structures during Cenozoic deformation in the Cordón del Plata and Southern Precordillera ranges (Mendoza, Argentina). *J. Iber. Geol.* 40 (2).

Geocronología y migración del evento de sedimentación de la Formación Las Chilcas del Cretácico medio a Tardío evidenciado por nuevas edades $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ en circones

Abigail Jackson-Gain¹, Luisa Pinto Lincoñir¹, Katja Deckart¹, Camilo Pérez Sánchez¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago Centro, Chile

Las unidades del Cretácico Temprano a Tardío en la región de Valparaíso de Chile Central ($\sim 32.5\text{--}33^\circ\text{S}$), aunque predominantemente volcánicas, presentan una secuencia sedimentaria importante, en el contacto entre las formaciones Cerro Morado y Las Chilcas. Estos depósitos se ubican en la base de la Formación Las Chilcas, y corresponden a rocas sedimentarias proximales de trasarco y están asociados con eventos de alzamiento y deformación en un contexto compresional durante el Cretácico Temprano tardío y Cretácico Tardío (Boyce, 2020). La secuencia sedimentaria está apoyada directamente sobre una secuencia de lavas y tobas líticas de la parte superior de la Formación Cerro Morado. Aunque se entiende la estratigrafía de esta transición, la temporalidad no estaba bien definida debido a la falta de dataciones en la región. En el presente estudio, presentamos nuevas edades $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ en circones magmáticos y detríticos de las formaciones Cerro Morado y Las Chilcas que ayudarán a definir esta temporalidad. Se dataron 6 areniscas y 4 tobas para obtener 6 edades máximas y 4 edades de depositación, respectivamente. Encontramos que la transición entre las formaciones Cerro Morado y Las Chilcas tiene una edad de ~ 110 Ma en el sector occidental de la zona de estudio (Ñilhue-San Felipe) mientras que en el sector oriental (Las Minillas-Campos de Ahumada), el evento de sedimentación comenzó a los ~ 92 Ma. Esto sugiere que la sedimentación se inició en el oeste y migró hacia el este, ~ 25 km en ~ 18 millones de años. Esto podría ser el resultado del frente de deformación desplazándose hacia el este o por el ensanchamiento de la cuenca trasarco por la deformación en el oeste. Esta propuesta de migración de la sedimentación hacia el este es coherente con los modelos estructurales de la región, que evidencian eventos de deformación que empezaron en el sector occidental a los ~ 110 Ma y cuyo frente de deformación migró hacia el este (Pérez et al., este congreso). Estas evidencias sedimentarias, geocronológicas y estructurales ayudan a entender mejor las condiciones tectónicas del margen occidental gondwánico durante el Cretácico Temprano tardío a Cretácico Tardío.

Palabras Clave: Cretácico, Geocronología, Formación Las Chilcas, U/Pb.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: Se agradece al equipo Mountain Building por su colaboración y a los ayudantes de terreno de este proyecto: Valentina Ramos, Basthian Cerón, Arturo Beeche, Camilo Pérez y Alonso Canales.

Referencias:

- Boyce, D., Charrier, R., Fariás, M., 2020. The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile ($32^\circ 50'\text{S}$). *Tectonics*, 39 (2), <https://doi.org/10.1029/2019TC005825>.
- Pérez-Sánchez, C., Pinto-Lincoñir, L., Espinoza Vargas, M., Jackson-Gain, A., 2023, Análisis geométrico y cronológico de los sistemas estructurales en la transición Cordillera de la Costa-Cordillera Principal al norte de los 33°S : Implicancias en la geología estructural al norte y sur de la Depresión de Los Andes–San Felipe. *Actas, XVI Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile*.

Tectonic inversion of the Abanico basin eastern border and the structuring of the Aconcagua thrust-fold belt, southern Central Andes at 32°-33°S

Pablo Herman¹, Pamela Paz Jara², Reynaldo Charrier¹⁻³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile USACH, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería, Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Escuela de Ciencias de La Tierra, República 220, Santiago, Chile

Introduction

Inversion tectonics, a process resulting from a switch in tectonic regime from pre-orogenic extension to orogenic compression, has increasingly been reported from many fold-thrust belts worldwide. The occurrence of extensional features within pre-thrusting templates is now recognized as an essential controlling factor for thrust systems' nucleation and propagation across precursor extensional basins. The Principal Cordillera in the central Chilean Andes consists of two north-south oriented swaths, a Cenozoic, to the west, and a Mesozoic, to the east. The study region of this new contribution (Herman et al., 2023) is located in the Principal Cordillera, between latitudes 32°45' and 33°S, and lies between the Pocomo fault zone and the Chile-Argentina international border. In this region, the distribution of the Mesozoic and Cenozoic units, and the precise stratigraphic location and nature of the contacts between the different units have not yet been fully determined. We therefore undertook a stratigraphic and structural analysis centered mainly on the Aconcagua and Juncal river valleys, primarily focused on the contact between the Cenozoic and Mesozoic deposits.

The objectives of this study are to characterize the Cenozoic units and their deformational styles, which are largely controlled by two major structural systems that determine the western and eastern boundaries of the Cenozoic deposits, the Pocomo (PFZ) and the Alto de Juncal fault zones respectively. The latter one represents the western border of the Aconcagua fold and thrust belt (AFTB). This contribution provides new information on: 1. Distribution of the litho-stratigraphic units present along the Aconcagua-Juncal river valley, 2. Depositional facies of the recognized units, in order to determine their affiliation with the already defined formal units in the Principal Cordillera in central Chile, 3. Tectonic features and styles present in the different stratigraphic units, in order to interpret the deformational mechanisms, 4. Identification of the deformational events, their relative chronology and contribution to uplift and shortening of the mountain range, and determining the causes of the west-to-east variations in style observed along the Aconcagua river valley cross-section.

Preliminary Results

A graphical estimation based on the generalized schematic profile for the study area revealed that the Principal Cordillera within the study latitude presents a minimum shortening of approximately 30–40 km, outlining the role of compressional stresses resulting from positive tectonic inversion during the geological evolution of the Andean chain between 32°45'-33°S. At the latitude of the study region, the main structure that would have controlled the eastern border of the Abanico basin would correspond to the Alto del Juncal Fault. This structure also marks the western limit of the Aconcagua fold and thrust belt. The Alto del Juncal Fault would correspond to the northward prolongation of the El Diablo fault, recognized at approximately 100 km to the south, in the El Volcán river valley sector. The east-directed Canchitas thrust, located immediately to the east of the Alto del Juncal fault, would correspond to the westernmost fault of the Aconcagua Fold and Thrust Belt. In the Aconcagua-Juncal river valleys it is possible to recognize 3 different structural domains: a western domain, a central domain and an eastern domain. The eastern and western domains are characterized mainly by N–S oriented regional structures, and the central domain is dominated by NW–NNW and NE–NNE oriented structures. The latter case controlled the internal architecture of the basin. The deformation is more intense towards the eastern domain, increasing the intensity of the deformation and decreasing the folding wavelength. The Abanico Formation in the study area is subdivided into 3 main lithological units: a lower volcanic-volcanoclastic unit, a sedimentary volcanic unit, and an upper volcanic-volcanoclastic unit, which show different processes and conditions in sedimentation and basin filling at the study latitude. The Principal Cordillera in Chile between 32°45'-33°S is characterized by a high structural complexity related to (i) the previous development of the Abanico extensional basin, (ii) its tectonic inversion, and (iii) the influence of inversion on the eastern basin bounding Alto del Juncal fault on the development of the east-vergent Aconcagua Fold-thrust Belt. We refer to Herman et al. (2023) for further details on these results.

Keywords: Andes, Principal cordillera, Aconcagua FTB, Abanico basin, Tectonic inversion.

References:

- Herman, P.; Jara, P.; Charrier, R. 2023. Tectonic inversion of the Abanico basin eastern border and the structuring of the Aconcagua thrust-fold belt, southern Central Andes at 32°-33°S. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104425>.

Geometry and formation mechanisms of a contractional wedge structure in the eastern Domeyko Cordillera, northern Chile: A comparative model from physical experiments

Cristopher López Aguilera¹, Chiara Del Ventisette²⁻³, Marco Bonini³, Domenico Montanari³, Daniele Maestrelli², Mitchelle Rioseco¹, Renato Cisternas¹, Sebastián Espinoza¹, Rodrigo González¹, Rodrigo Riquelme¹, Fernando Martínez⁴

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Università di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, Firenze, Italy

(3) CNR-IGG, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geoscienze e Georisorse, U.O.S. Firenze, Via G. La Pira 4, I-50121, Firenze, Italy

(4) Universidad Andres Bello, Escuela de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Campus República, Salvador Sanfuentes 2357, Santiago, Chile

A contractional wedge structure is one of the most efficient mechanisms for developing orogenic growth. Its displacement is often transferred from a deeper fault to an overlying fault with an opposite-dipping direction, accommodating a great part of the tectonic shortening. This kind of structure transfers deformation vertically, towards superficial levels, generating thrusting systems located laterally. Some common forms of this structural style are generally referred to as 'intercutaneous wedges', 'triangle zones', and 'passive roof duplexes'. In this context, incompetent upper stratigraphic levels play an important role in generating possible décollement levels. Furthermore, the shape and kinematics of the main faults control the synorogenic deposition and erosion process. In the inner forearc of the Central Andes, specifically in the Domeyko Cordillera and the Salar de Atacama Basin transitional border, northern Chile, structures that affect both the basement and the stratigraphic coverage are recognized. However, the geometry and kinematics of those structural styles that have been defined as a hybrid system (thick- and thin- skinned tectonics), have not yet been specified. In this context, one interesting question is to understand what are the mechanisms that induce uplift along the inner Andean forearc. In this work, we presented a new structural model explaining the development and orogenic growth of the western Central Andes. To contribute to this discussion, we analyze and interpret fieldwork data combined with 2-D reflection seismic profiles. We then compare and validate our interpretations, by performing a new series of analogue models addressing positive tectonic inversion. On this basis, we propose an integrated kinematic model for the Domeyko Cordillera and the Salar de Atacama Basin transitional border. Our structural interpretation describes the relationships between inherited extensional structures, inversion structures, and pure thrust faults. The proposed evolutionary model envisages (1) an initial syn-rift stage related to the fill of half-graben basins, (2) a second stage of tectonic inversion, and finally, (3) a third compressional stage with syn-shortening sedimentation and the generation of east-verging thrust faults. These models allow us to propose that those incompetent stratigraphic levels, such as the evaporitic layers related to post-rift deposits, may influence the development of opposite-verging thrust faults (passive roof thrusts) that accommodate the deformation of the contractional wedge structure.

Keywords: Contractional Wedge Structure, Pure Shortening, Domeyko Cordillera, Inner Andean Forearc, Analogue Models.

El antearco andino (26°S): estilos estructurales y arquitectura tectónica pre-orogénica

Fernando Martínez¹, Cristopher López²

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Por décadas, la estructura del antearco andino (26°S) ha sido intensamente debatida. Diversos modelos han sido propuestos para explicar su evolución tectónica, incluyendo, una variedad de mecanismos, tales como, extensión, acortamiento, transpresión y deformación de rumbo que frecuentemente son indicados para explicar la estructura de las cordilleras y cuencas intermontañas (Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Cuencas pre-Andinas, etc.) establecidas en la región. En los últimos años, nuevas evidencias geológicas han permitido generar un nuevo debate sobre la influencia que tuvieron las estructuras pre-orogénicas (fábricas en el basamento, sistemas de fallas normales pre-existentes, entre otras) en la distribución de los estilos estructurales, y, en los mecanismos de alzamiento del antearco. En atención de incorporar nuevos antecedentes que ayuden a resolver este debate, se presentan los resultados de la primera sección cortical balanceada del antearco andino, que se proyecta desde la Cordillera de la Costa hasta el Arco Volcánico moderno cubriendo una longitud de 210 km. Esta sección fue construida integrando datos de campo, perfiles de reflexión sísmica 2D migrados en doble tiempo y datos de pozos petroleros, y, posteriormente fue restaurada a un estado pre-acortamiento. Nuestros resultados indican que los estilos estructurales en la región consisten en estructuras vinculadas a inversión tectónica, tales como anticlinales y fallas de atajo ("shortcuts"), y, también cabalgamientos de basamento que conectaron con niveles estratigráficos para finalmente generar una serie de pliegues relacionados a cabalgamientos de cobertura (fold-related thrusts), preferencialmente localizados en el antearco interno. Todos estos estilos usualmente involucran secuencias syn-rift y synorogénicas en su estructuración. Su evolución, distribución y variaciones geométricas, están directamente influenciadas por la arquitectura pre-orogénica del margen continental. La restauración del acortamiento, indica que esta arquitectura está caracterizada por una serie hemi-graben Permo-Jurásicos, desarrollados durante distintas fases de estiramiento y adelgazamiento de la corteza, previo al alzamiento andino. Estos hemi-graben yacen limitados por fallas normales conjugadas que alternan en su inclinación (O-E) y absorbieron cerca de 17 km de acortamiento mínimo. La reactivación inversa de las fallas de borde con polaridades opuestas frecuentemente dio lugar a estructuras de doble vergencia. Mas del doble del acortamiento mínimo total (11 km) fue acomodado por cabalgamientos desarrollados posteriormente a la inversión tectónica de los hemi-graben, por lo tanto, ellas resultaron las más influyentes para el engrosamiento de la corteza.

Palabras Clave: Antearco andino, Inversión tectónica, Acortamiento, hemi-graben.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt n°11170098 y Conicyt PAI-2019/13334918.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el proyecto Fondecyt n°11170098 y Conicyt PAI-2019/13334918. Un especial agradecimiento a Lisandro Rojas, Mary Rogan, R. González, R. Riquelme y C. Arriagada.

Carbonatita, brecha ultramáfica, sienita y basaltos alcalinos de la asociación ígnea y sedimentaria del rift boliviano

Ramiro Matos¹

(1) Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente, Ciencias Geológicas, Calle 27, Pabellón Geología, Campus Universitario Cota Cota, La Paz, Bolivia

El Paleozoico de la Cordillera Oriental de los Andes Centrales de Bolivia del Ordovícico al Devónico ha sido deformado y plegado por la tectónica Hercínica cuyo metamorfismo regional desarrolló un clivaje pizarroso y de crenulación en el paquete sedimentario. El lapso Pérmico superior -Cretácico Inferior con cuencas de ambiente continental caracterizadas por ingresiones marinas someras y esporádicas que depositaron sedimentos químicos con calizas y chert. Ese conjunto rocoso forma una asociación volcano-sedimentaria resultante del adelgazamiento litosférico que condujo a la formación de un rift que posteriormente fue abortado. Durante el Cenozoico, por un proceso de inversión tectónica debido a la orogenia Andina, esas cuencas sufrieron acortamiento que condujo a la formación de un relieve escarpado de anticlinales y sinclinales regionales asociados a fallas inversas y de deslizamiento de rumbo. Los sinclinales, a diferencia de los anticlinales, muestran una expresión de relieve topográfico y geológico que, vistos en imágenes satelitales, destacan por su forma y extensión. Entre los principales sinclinales podemos citar Toro Toro, Maragua, Icla y San Lucas. La asociación ígnea está constituida de cuerpos subvolcánicos, plutónicos someros, coladas de lava, stocks, diques y sills de composición máfica-ultramáfica en general de composición alcalina.

El trabajo de mapeo en el área de Independencia condujo al hallazgo de una carbonatita. La roca es un stock intruido en sedimentitas ordovícicas de la Formación Anzaldo. La Carbonatita Chiaracke, la primera identificada en los Andes de Bolivia, es de 1.200 metros de largo y un ancho de 500 metros. El estudio preliminar indica que consiste de una ferrocronatita y una magnesiocronatita o beforita. Además, contiene tenores bajos de bastnaesita, acompañada de pirocloro y monazita como minerales accesorios. El rasgo más significativo es el contenido anómalo de Zn, Pb y Mo. El cerro Sapo, situado 7 km al norte de la carbonatita, es un stock de sienita que contiene un dique de sodalita, ankerita y barita de 8 m de ancho.

Cuerpos de brecha ultramáfica y diques de basaltos alcalinos afloran en los alrededores de la laguna Kohallaqui alojados en metalimolitas de la Fm Anzaldo. La brecha ultramáfica forma cuerpos subredondeados y diques conteniendo xenolitos del manto conteniendo olivino, piroxeno y granate de la variedad melanita y cantidades subordinadas de nefelina, sodalita, apatito, serpentina, flogopita, pirita, esfalerita, hematita y calcopirita. Dataciones K-Ar en flogopita de la brecha ultramáfica y en lamprófito produjeron 101 a 99 Ma.

El cuerpo de composición alcalina del Cerro Picacho es una brecha de forma alargada, de 500 metros de ancho y 2.200 metros de largo. La roca está expuesta, constituyendo protuberancias subcirculares que sobresalen en el paisaje. Los fragmentos de la brecha son de matriz sostén, de tamaño, forma, composición y color variable. En tamaño son de pocos milímetros a 0,80 metros de largo; la forma es subangulosa a redondeada. En composición son clastos de sienita nefelínica, gabro alcalino o theralita, piroxenita, ijolita y hornfels.

En Toro Toro la asociación ígnea y sedimentaria muestra una columna estratigráfica propia de un rift abortado. Las ingresiones marinas someras y esporádicas depositaron sedimentos químicos con calizas y chert. La asociación ígnea comprende lavas, diques y sills máficos a ultramáficos de composición alcalina. En San Lucas, un stock alcalino produjo una edad SHRIMP en zircones de 93 Ma.

El objetivo se enfoca en la asociación ígnea-sedimentaria y en el estilo estructural mostrado en los mapas. La región es de especial interés por la complejidad de los pliegues, fallas y por la estrecha relación entre la estratigrafía y la estructura. Este trabajo se basa en la observación de campo, imagen satelital y petrografía ígnea y sedimentaria.

Palabras Clave: Cordillera Oriental, Andes Centrales, Bolivia.

Financiamiento: Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Inversión tectónica negativa en el desarrollo pre-orogénico del antearco andino del norte de Chile

Isidora Medina Toledo¹, Renato Cisternas Saldívar¹, Cristopher López Aguilera¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ing. y Cs. Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Los mecanismos de inversión tectónica han sido ampliamente estudiados en variados orógenos del mundo (Welbon & Butler, 1992; López *et al.*, 2022; entre otros). Muchas de estas estructuras han sido relacionadas a inversión tectónica positiva por sus relaciones geométricas y cinemáticas, en las que depocentros extensionales son extruidos y alzados por estructuras de compresión (McClay & Buchanan, 1992; Williams *et al.*, 1989). En los Andes, destacan la Cuenca Neuquina en Argentina y la Cuenca de Tarapacá en el norte de Chile (Fuentes *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2021). El escenario es distinto cuando se habla de inversión tectónica negativa, ya que, los trabajos que consideran este mecanismo de deformación son escasos (*e.g.*, Di Domenica *et al.*, 2012; Pace *et al.*, 2022; Tari *et al.*, 2023). La carencia de este tipo de estudio se debe principalmente a la falta de afloramientos de unidades de basamento, que evidencien relaciones estratigráficas y estructurales, vinculadas con etapas orogénicas tempranas. En el borde occidental sudamericano, el registro de evolución tectónica preandina se ha asociado con antiguos terrenos acrecionados durante el Paleozoico. Por ejemplo, destaca el orógeno de Terra-Australis (Cawood, 2005), en el que distintos bloques continentales se habrían acrecionado al borde occidental de Gondwana. Así también, apertura y cierre de cuencas habrían condicionado procesos orogénicos en el registro preandino durante el Paleozoico (*e.g.*, Alvarado & Folguera, 2019). En el norte de Chile, algunas unidades que forman parte del basamento paleozoico preandino se exponen principalmente a lo largo de la Cordillera de la Costa (Fm. El Toco, Fm. Sierra del Tigre y Fm. Las Tórtolas). Estas unidades se caracterizan por su intensa y penetrativa deformación compresiva, marcando notorias discordancias angulares con los depósitos mesozoicos que le sobreyacen, desarrollados principalmente entre el Triásico Superior y Jurásico Inferior (Fm. Cifuncho, Fm. La Negra y Estratos de Rencoret). Sin embargo, nunca se ha planteado si hay alguna relación directa entre las estructuras puramente compresivas que controlan la deformación de las unidades paleozoicas con las estructuras extensionales que condicionan el desarrollo de las cuencas de rift mesozoicas. En este trabajo, se presenta una primera aproximación sobre un mecanismo de inversión tectónica negativa como control estructural en la historia preandina de los Andes Centrales en el norte de Chile. Se plantea que las estructuras extensionales que condicionaron el desarrollo *syn-rift* de los depósitos mesozoicos, fueron inducidas por corrimientos regionales a lo largo de las unidades de basamento paleozoico de la Cordillera de la Costa. Para esto, se considera como caso de estudio, las unidades expuestas en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa (ca. 23°35'01" Lat. S, 69°53'57" Long. W), en donde afloran las Fms. Sierra del Tigre y Cerros de Cuevitas del Carbonífero Superior-Pérmico y las unidades suprayacentes de los Estratos de Rencoret y la Fm. La Negra del Triásico Superior-Jurásico Inferior, respectivamente. De esta manera, se plantea un nuevo mecanismo estructural, relacionado a inversión tectónica negativa, como un condicionante en el desarrollo pre-orogénico del antearco de los Andes Centrales.

Palabras Clave: Inversión Tectónica Negativa, Evolución Tectónica Preandina, Norte de Chile, Cordillera de la Costa

Financiamiento: Nombre del proyecto: VRIDT-UCN2095 Número de proyecto: 10201251.

Referencias:

- Alvarado, J. D., & Folguera, A. (2019). Evolución tectónica del continente sudamericano. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(3), 278-285.
- Cawood, P. A. (2005). Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic. *Earth-Science Reviews*, 69 (3-4), 249-279.
- Di Domenica, et al. (2012). Relationship between thrusts and normal faults in curved belts: new insight in the inversion tectonics of the Central-Northern Apennine (Italy). *J Struct Geol* 30:1–14.
- Fuentes, G., et al. (2018). Tectonic architecture of the Tarapacá Basin in the northern Central Andes: New constraints from field and 2D seismic data. *Geosphere*, 14(6), 2430–2446.
- López, C., et al. (2022). The relationship between inverted normal faults and pure thrusting during the tectonic inversion of the Domeyko Cordillera, northern Chile: structural and seismic interpretation and analog modeling experiments. *Tectonics*, 41(12).
- Martínez, F., et al. (2021). Buried thrust belt front of the western Central Andes of northern Chile: Style, age, and relationship with basement heterogeneities. *J Struct Geol*, 147, 104337.
- McClay, K. R., & Buchanan, P. G. (1992). Thrust faults in inverted extensional basins. In *Thrust tectonics* (pp. 93–104). Springer.
- Pace, P., Calamita, F., Tavarinelli, E. (2022). Shear zone fabrics and their significance in curved, inverted basin-derived thrust systems. *J. Struct. Geol.* 161, 104663.
- Tari, G., et al. (2023). Negative structural inversion: An overview. *Marine and Petroleum Geology*, 106223.
- Welbon, A. I., & Butler, R. W. H. (1992). Structural styles in thrust belts developed through rift basins: a view from the western Alps. In *Structural and tectonic modelling and its application to petroleum geology* (pp. 469-479). Elsevier.
- Williams, G. D., Powell, C. M., & Cooper, M. A. (1989). Geometry and kinematics of inversion tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1), 3–15.

Nuevos antecedentes estratigráficos para la Unidad Las Coloradas en el sector del valle del río Volcán, localidad de Lo Valdés, Región Metropolitana

Gabriel Mella Gübeli¹, Gabriel Florez¹, Tania Villaseñor², Reynaldo Charrier¹⁻³, Felipe Tapia⁴

(1) Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Campus República, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, CONICET- Instituto de estudios andinos (IDEAN), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Int. Güiraldes 2160 (C1428EGA), Buenos Aires, Argentina

La cuenca de trasarco Neuquina, que se sitúa en la parte este de Chile y oeste de Argentina entre los 30° y 40° S, alojó una serie de unidades marinas y continentales entre el Jurásico Inferior y Cretácico Superior, que reflejan la evolución de dos ciclos de transgresión-regresión, que resultan de controles tectónicos, cambios en el nivel del mar y actividad volcánica en la región (Howell et al. 2005; Charrier et al. 2014). Cada uno de estos ciclos terminó con el depósito de potentes sucesiones continentales de coloración rojiza. La unidad continental que cierra el segundo ciclo se ha denominado Formación Colimapu, de amplia distribución en la Cordillera Principal chilena y su equivalente en la vertiente argentina la Formación Huitrín-Rayoso. En la Cordillera Principal en Chile central (33°S) existen frecuentes afloramientos de depósitos sedimentarios de coloración rojiza que en general han sido atribuidos a la Formación Colimapu (Klohn, 1960). Entre ellos están los depósitos que se encuentran en el valle del río Volcán cerca de la localidad de Lo Valdés, que fueron identificados por González (1963) y Thiele (1980) como Formación Colimapu (Hauteriviano-Albiano). Sin embargo, estudios geocronológicos posteriores (Aguirre-Urreta y Vennari, 2009; Aguirre et al. 2009; Tapia, 2015) reportan edades U-Pb del Cretácico Superior en circones detríticos de esta unidad, la cual fue denominada posteriormente por Mardones (2019) como Unidad Las Coloradas. En la faldada occidental del cordón del cerro Retumbadero, esta unidad se ha descrito como una secuencia de ~850 m de espesor de finas capas de areniscas rojas con intercalaciones de pelitas gris-verdosas en la parte inferior que gradan hacia el techo a areniscas feldespáticas con intercalaciones de tobas amarillentas de 1-2 m de espesor, volcarenitas epiclásticas y limolitas bioclásticas (Bustamante, 2001). Su base es desconocida y sobre esta unidad y en contacto levemente discordante se desarrolla una sucesión calcárea de unos 100 m de espesor.

En este resumen se presentan nuevos antecedentes sobre la estratigrafía de la Unidad Las Coloradas que resultan de un estudio que busca profundizar en las litofacies y su interpretación en términos de ambientes de formación. La secuencia estudiada se caracteriza por presentar dos ciclos grano y estrato-crecientes de lutita/arenisca/conglomerado en los que, el segundo ciclo presenta una granulometría y estratificación más gruesas que el anterior. En la base de estos ciclos se encuentran intercalaciones calcáreas de 30-40 cm de espesor entre niveles de lutitas y areniscas. Así mismo, en discordancia sobre el segundo ciclo, se dispone un potente nivel de caliza.

Estos ciclos se interpretan como la respuesta en la región distal de una cuenca de antepaís a pulsos de alzamiento. La presencia del delgado espesor de calizas al inicio de los dos ciclos y de otro nivel calcáreo, considerablemente más grueso sobre el segundo ciclo, indicarían la existencia, posiblemente hacia el este, de un extenso cuerpo de agua. En este cuerpo las condiciones habrían permitido el depósito de carbonatos, los que, con la subsidencia producida a continuación de cada pulso de alzamiento corresponderían a eventos transgresivos del cuerpo de agua sobre los depósitos rojos de la Unidad Las Coloradas, dando origen a los depósitos calcáreos observados. La discordancia ligeramente angular que separa a los niveles de la parte superior del segundo ciclo del potente nivel superior de calizas correspondería al efecto de deformación y alzamiento al final del segundo ciclo y a la subsiguiente erosión de las areniscas rojas debida al oleaje en el cuerpo de agua.

Se comparan estos resultados con la estratigrafía de depósitos contemporáneos de la cuenca Neuquina en que afloran hacia el lado este de la faja plegada y corrida para proponer una reconstrucción paleogeográfica.

Palabras Clave: Cretácico Superior, Formación Colimapu, Cuenca Neuquina.

Financiamiento: Este trabajo investigativo se encuentra en el marco del proyecto Fondecyt#1210475, a cargo de Reynaldo Charrier. La participación al congreso fue financiada por parte de la Universidad Andrés Bello.

Agradecimientos: Agradezco al profesor Reynaldo Charrier y a la profesora Tania Villaseñor por todo el apoyo y confianza durante el proceso y también al Grupo Disciplinario Geopatrimonio y Educación (GPGE UNAB).

Referencias:

- Aguirre, L., Calderón, S., Vergara, M., Oliveros, V., Morata, D., & Belmar, M. (noviembre de 2009). Edades isotópicas de rocas de los valles Volcán y Tinguiririca, Chile central. In Congreso Geológico Chileno (No. 12, p. S8-001).
- Aguirre-Urreta, B., & Vennari, V. (2009). On Darwin's footsteps across the Andes: Tithonian-Neocomian Fossil invertebrates from the Piuquenes pass. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 64. 32-42.
- Bustamante, M. (2001). Análisis del contacto Meso-Cenozoico en el valle del río Volcán, Cordillera de los Andes de la Región Metropolitana, Santiago, Universidad de Chile.
- Charrier, R., Ramos, V. A., Tapia, F., & Sagripanti, L. (2014). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 378S (Chile and Western Argentina). Geological Society, Vol. 399, 13-61.
- Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A., & Veiga, G. D. (2005). The Neuquén Basin: an overview. Geological Society, Vol 252(1), 1-14.
- Klohn, G. (1960). Geología de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile., Vol. 8, 95.
- Mardones, V. (2019). Evolución tectónica Meso- Cenozoica de la Cordillera Principal de los Andes de Chile Central, 33°30'S-34°S.
- Tapia, F. (2015). Evolución Tectónica y configuración actual de los Andes Centrales del sur (34°45'- 35°30'S), Santiago, Chile, Universidad de Chile.
- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, v. Carta Geológica de Chile 29.

Análisis de la zona de falla Pocuro en el sector Campos de Ahumada: Evidencias de estructuras de transferencia y sus implicancias en la deformación del borde occidental del orógeno Andino (~32°43'S)

Javier Millanao Llopis¹, Luisa Pinto Lincofiir², Joaquín Cortés Aranda¹, Laura Giambiagi³, Pamela Jara Muñoz⁴

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) IANIGLA - CCT Mendoza, CONICET, Parque San Martín, Mendoza, Argentina

(4) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería, Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile

A la latitud de los ~33°S, en el borde occidental de los Andes Centrales, se reconoce un contexto geodinámico compresivo, correspondiente al límite sur del segmento *flat slab*, asociado a la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández (Ramos et al., 2002). Al norte, entre los 32° y 33°S, destaca la Zona de Falla Pocuro (ZFP) (Rivano, 1996) como un rasgo estructural de escala regional (~100 km de largo), el cual alberga sistemas de fallas inversas de rumbo N-S a 20°, de alto ángulo, con vergencia al oeste, y en parte con movimiento de rumbo dextral (Campbell, 2005); además, ocurren rasgos geomorfológicos deformados justo sobre la zona de falla.

En particular, el sector de Campos de Ahumada (~32,44°S), representa un punto de transición estructural complejo dentro de la ZFP, pues en la zona inmediatamente al sur, la traza de la zona de falla parece estar acotada a su actividad cuaternaria representada por el Sistema de Fallas Cariño Botado (SFCB) (Estay et al., 2023). Por su parte, desde Campos de Ahumada hacia el norte, la ZFP pareciera dispersarse y ramificarse en al menos dos fallas principales y paralelas, representadas por la Falla Campos de Ahumada y la Falla Jahuel (Machuca, 2017). Estas últimas montañas, respectivamente, rocas de la Formación Abanico (Oligoceno-Mioceno Inferior, ~34-19 Ma) por sobre la Formación Las Chilcas (Albiano medio-Campaniano temprano, ~105-82 Ma), y rocas de la Formación Cerro Morado (Aptiano tardío-Albiano temprano, ~116-106 Ma) por sobre la Formación Las Chilcas.

Nuevos estudios estratigráficos (Canales, 2022) y geocronológicos (Jackson-Gain et al., 2022) han identificado rocas cenozoicas al este de la ZFP, en el sector del Estero San Francisco. Sin embargo, en el sector de Campos de Ahumada, justo al norte del estero, no hay información clara sobre la estratigrafía y tampoco existe un modelo de deformación que relacione estructuralmente estos dominios.

En este trabajo, se propone como hipótesis un modelo de estructuras de transferencia que permitirían el traspaso del acortamiento desde una traza principal de la ZFP, en el sur, a ramificaciones paralelas N-S, como la Falla Campos de Ahumada y la Falla Jahuel, a través de fallas secundarias, en el norte. Con el objetivo de validar esta hipótesis, se realizó un estudio estratigráfico y estructural en el entorno de Campos de Ahumada para comprender la deformación de las unidades, caracterizando la cinemática y dinámica general de las estructuras identificadas.

Los resultados preliminares permiten verificar la presencia de secuencias esencialmente de tipo volcano-sedimentarias, asignadas a las formaciones Cerro Morado, Las Chilcas y Abanico en la zona de estudio. Los sistemas estructurales principales reconocidos corresponden a fallas de rumbo N-S a 20°, y sistemas secundarios de rumbo 300°, 315° y E-O, con fuertes componentes de desplazamiento en el rumbo con sentido sinistral y manteos de alto ángulo (>45°). Estos datos indican que existen sistemas estructurales secundarios, transcurrentes y oblicuos a las fallas principales, que actuarían como zonas de transferencia, permitiendo el traspaso de la deformación y podrían incidir en la ubicación del frente de deformación del borde occidental de la Cordillera Principal más al oeste, desde Campos de Ahumada hacia el norte.

Tras la integración de la información se procedió a modelar cinemáticamente los datos, de modo que su análisis ha permitido comprender de mejor manera la evolución de la deformación en el área de estudio.

Palabras Clave: Transición estructural, Estructuras de transferencia, Sistemas estructurales.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado principalmente por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto) y secundariamente por el Proyecto Fondecyt Iniciación 11180509 (J. Cortés).

Agradecimientos: Se agradece al DCT UdeC, al equipo Mountain Building, a los ayudantes de terreno Catalina Rivera, Camilo Pérez y comunidad de Campos de Ahumada, por contribuir en diversas áreas a esta investigación.

Referencias:

- Campbell, D. (2005). Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Memoria de Título (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 113 pp.
- Canales, A. (2022). Análisis estratigráfico de las unidades meso-cenozoicas entre el valle de Aconcagua y el estero San Francisco: implicancias para el alzamiento de la Cordillera principal de Chile central (32°48'S). Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 83 p. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186987>.
- Estay, J., Pinto, L., Easton, G., De Pascale, G.P., Troncoso, M., Carretier, S., Forman, S.L. (2023). Active thrust tectonics along the western slope of the Central Andes southernmost Pampean flat-slab segment (33°S, Chile): The Cariño Botado fault system. *Geomorphology* 437, 108801. ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108801>.
- Jackson-Gain, A., Deckart, K., Pinto, L. (2022). Constraining the location of the Meso-Cenozoic boundary using U-Pb dating in the context of the Pocuro Fault Zone in Central Chile (32-33°S). *Actas, SSAGI*, Santiago, Chile.
- Machuca, C. (2017). Estratigrafía y estructuras de la zona de falla Pocuro entre los 32°30'S y los 33°S. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 108 pp. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150696>.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O., Pérez, D.J. "The Pampean flat-slab of the Central Andes". (2002). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1):59-78. [doi:10.1016/S0895-9811\(02\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00006-8).
- Rivano, S. (1996). Geología de las hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Informe inédito, 191 pp.

Inversión tectónica jurásica de cuencas de rift de intraarco: la Cuenca Cifuncho en la Cordillera de la Costa, Andes Centrales del norte de Chile

Daniela Montenegro¹, Rodrigo González T.¹, Christopher López¹, Juliana Marques², Matías Navea Jara¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brasil

El proceso de subducción en el margen occidental andino ha sido responsable de los diferentes regímenes tectónicos y episodios de deformación reconocidos en el antearco de los Andes Centrales del norte de Chile. El principal episodio de deformación mesozoico registrado en el antearco, entre los 20° y 27°S, corresponde a una extensión triásica–jurásica como resultado de un proceso de *roll-back* de la placa subductante (e.g., Oliveros *et al.*, 2020). La extensión mesozoica es seguida por un episodio compresional activo desde el Cretácico tardío hasta la actualidad, gatillado por la apertura del Atlántico Sur (e.g., Le Pichon *et al.*, 2023). El episodio extensional generó cuencas de rift de graben y/o hemi-graben con depósitos sinrift triásicos continentales y jurásicos marinos (e.g., Cuenca de Tarapacá), que fueron posteriormente invertidas durante un proceso de inversión tectónica en el Cretácico tardío. La inversión tectónica positiva ha sido ampliamente documentada en las zonas de la Cordillera de Domeyko (e.g., Martínez *et al.*, 2021) por medio de perfiles de reflexiones sísmicas 2-D y datos estructurales de superficie, los cuales evidencian algunas estructuras de inversión tales como fallas normales invertidas, *shortcut faults*, entre otras. Sin embargo, en la Cordillera de la Costa, los procesos de deformación solo se han relacionado a extensión cortical seguida por fallamiento de rumbo sinistral asociado con el Sistema de Falla de Atacama (Scheuber y Gonzalez, 1999). No obstante, no existen evidencias de inversión tectónica en la Cordillera de la Costa del norte de Chile, a pesar de considerarse como un mecanismo de construcción orogénica, ampliamente reconocido en los Andes Centrales.

La Cuenca Cifuncho, ubicada en la Cordillera de la Costa ca. 26°S, corresponde a una cuenca extensional mesozoica que expone las únicas secuencias de sinrift continuas desde el Triásico Medio hasta el Jurásico Medio registradas en el antearco externo (Contreras *et al.*, 2013). El Sistema de Fallas Tigrillo limita occidentalmente la cuenca, sin embargo, se desconoce su rol en el origen y evolución de esta. La presente investigación involucra un análisis multidisciplinario que combina trabajo de terreno, mapeo a escala 1:50.000, análisis estereográfico de la deformación y geocronología U–Pb en circón de rocas ígneas, con la finalidad de caracterizar la evolución estructural de la actual Cordillera de la Costa durante el Triásico–Jurásico. Se propone que la Cuenca Cifuncho tuvo un desarrollo inicial como una cuenca de hemi-graben durante el Triásico Medio al Jurásico Inferior en posición de intraarco, en la que se depositaron las secuencias de sinrift pertenecientes a las Formaciones Agua Chica, Cifuncho, Pan de Azúcar y Posada de los Hidalgo. En esta etapa, el Sistema de Fallas Tigrillo actuó como borde de cuenca. Posteriormente, un evento compresivo produjo la inversión tectónica positiva de la Cuenca Cifuncho con la inversión parcial de fallas normales y generación de estructuras como *shortcuts faults*, anticlinales de inversión, entre otras. El análisis estereográfico de pliegues indica un acortamiento principal de orientación aproximada NNO–SSE, perpendicular al Sistema de Fallas Tigrillo. Además, el análisis de fallas de este sistema muestra cinemáticas inversas con direcciones de acortamiento compatibles con el plegamiento de las secuencias sinrift. Por otro lado, se obtuvieron cuatro nuevas edades U–Pb en circón: dos procedentes de domos volcánicos emplazados previamente a la inversión a lo largo del Sistema de Fallas Tigrillo que cortan a las secuencias sinrift, y dos edades de diques post-tectónicos a la deformación compresiva. Estos nuevos resultados indican que la inversión tectónica positiva de las cuencas extensionales de la Cordillera de la Costa habría ocurrido por un evento compresivo durante el Jurásico Inferior, el más antiguo registrado en el norte de Chile. De esta manera, el proceso de inversión tectónica registrado en la Cuenca Cifuncho sería más antiguo que el reconocido en las cuencas de la Cordillera de Domeyko.

Palabras Clave: cuencas de rift, inversión tectónica, intraarco, Cordillera de la Costa.

Financiamiento: Los autores agradecen el apoyo de los proyectos ANID FAPESP 2019/13349-8 titulado “Tectono-stratigraphic evolution of inter-montane basins related to forearc tectonic settings, using the Chilean Pre-Andean Depression of the Central Andes as a case study” y el “Fondo para el desarrollo en investigación científica y tecnológica de actividades de titulación de pregrado y postgrado” Año 2022 de la Universidad Católica del Norte.

Referencias:

- Contreras, J. P., Espinoza, M., de la Cruz, R., Jorquera, R., Kraus, S., Ramírez, C., Naranjo, J. A., Escribano, J. & Martínez, P. (2013). Carta Cifuncho, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 161(1).
- Le Pichon, X., Şengör, A. C., Jellinek, M., Lenardic, A., & Imren, C. (2023). Breakup of Pangea and the Cretaceous Revolution. *Tectonics*.
- Martínez, F., Peña, M., Parra, M., & López, C. (2021). Contraction and exhumation of the western Central Andes induced by basin inversion: New evidence from “Pampean” subduction segment. *Basin Research*, 33(5), 2706–2724.
- Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Lucassen, F., Ducea, M. N., Ciocca, I., González, J., Espinoza, M., Salazar, E., Coloma, F. & Kasemann, S. A. (2020). Lithospheric evolution of the Pre- and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 80, 202–227.
- Scheuber, E., & Gonzalez, G. (1999). Tectonics of the Jurassic–Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22–26 S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18(5), 895–910.

Geologic evolution of the Sierra Gorda district, Antofagasta Region, Chile

Jorge Osvaldo Muñoz Bravo¹, Paul Duhart Oyarzo² David Quiroz Pincheira²

(1) SERNAGEOMIN, Av. Santa María 0104, Santiago Chile

(2) SERNAGEOMIN, La Paz 406, Puerto Varas, Chile

The geological evolution of the Sierra Gorda district highlights the development of successive magmatic, sedimentary and tectonic stages, active by the Early Carboniferous-Permian, Late Triassic-Early Cretaceous, Upper Cretaceous, Paleocene, Eocene and Oligocene-Miocene (Duhart *et al.*, 2018, and references cited). Metamorphic and intrusive rocks of Carboniferous-Early Permian ages, along the southwestern edge of Gondwana, were exhumed and juxtaposed during the course of the Middle-Upper Permian (San Rafael tectonic phase), synchronously with the accretion of oceanic lithosphere (Tomlinson *et al.*, 2012). Upper Triassic-Early Cretaceous crustal extension, related to the split-up of Pangaea, generates two transgressive-regressive stages. The first began during the Upper Triassic with sediments, lavas and pyroclastics deposited in continental and marine environments, continuing into the Lower Jurassic in marine environments. The second, with marine sedimentation during the Middle Jurassic evolved to transitional in the Kimmeridgian and to continental through Tithonian-Early Cretaceous times (Cornejo *et al.*, 2003; Duhart *et al.*, 2018). Those rocks were deformed as a result of the Peruvian phase. Later, Campanian and Maastrichtian magmatic stages together with continental sedimentary basins are well recorded. The former was less voluminous than the latter. Both stages are associated with a low velocity rate and high obliquity of convergence geometry (Somoza and Ghidella, 2005), with a normal angle of subduction and transtensional tectonic, probably without cortical thickening (Haschke *et al.* 2002). Paleocene magmatism produced Cu-Au breccias, Au and polymetallic veins, as well as Cu-Au-Mo porphyries (Bunker *et al.*, 2017; Shaver *et al.*, 2009), immediately after the K-T tectonic phase (Cornejo *et al.*, 2003). Further east, Middle Eocene Cu-Au-Mo porphyries (Perelló *et al.*, 2010) were related to increase and orthogonality of convergence geometry, and to transpressive kinematics of the Domeyko Fault System (Incaic phase). Uplift, erosion and deposition in continental sedimentary basins dominated from Late Eocene to Miocene times. Humid climates during Oligocene-Miocene times, generated paleo soils interbedded with sedimentation of gravels, sands and river silts (May, 2005; Blanco, 2008; Riquelme *et al.* 2017; Tomlinson *et al.*, 2018). Humid Oligocene and Miocene climate allowed supergene alteration and secondary enrichment in the Paleocene and Eocene Cu-Au-Mo porphyries, in addition to exotic Cu in the El Tesoro Central, El Tesoro Noreste and north of Spence mineral deposit. Gypsum interbedded with Upper Miocene alluvial deposits evidences hyperarid climatic conditions prevailing until today.

Keywords: Magmatism, Sedimentation, Tectonic, Mineral resources.

Financing: SERNAGEOMIN, Chile.

Acknowledgements: This contribution is supported by SERNAGEOMIN, Chile.

References:

- Blanco, N. 2008. Estratigrafía y evolución tectono-sedimentaria de la cuenca cenozoica de Calama (Chile, 22°S). Universidad de Barcelona: 68 p.
- Bunker, E.; Blundy, J.; Cooper, F.; Condon, D.; Tapster, S. 2017. Applied Earth Science, Section B 126 (2): 46-48.
- Cornejo, P.; Matthews, S.; Pérez de Arce, C. 2003. Congreso Geológico Chileno, No. 10.
- Duhart, P.; Muñoz, J.; Quiroz, D.; Mestre, A.; Varas, G. 2018. Carta Geológica de Chile 198. Santiago.
- Haschke, M.; Siebel, W.; Gunther, A.; Schuber, E. 2002. Journal of Geophysical Research 107 (B1): 6-18.
- May, G.; Hartley, A.J.; Chong, G.; Stuart, F.; Turner, P.; Kape, S.J. 2005. Revista Geológica de Chile 32 (1): 33-58.
- Mpodozis, C.; Cornejo, P. 2012. Society of Economic Geologists, Special Publication 16: 329-360.
- Perelló, J.; Muhr, R.; Mora, R.; Martínez, E.; Brockway, H.; Swaneck, T.; Artal, J.; Mpodozis, C.; Munchmayer, C.; Clifford, J.; Acuña, E.; Valenzuela, D.; Argandoña, R. 2010. Society of Economic Geologists, Special Publication 15: 229-252.
- Riquelme, R.; Tapia, M.; Campos, E.; Mpodozis, C.; Carretier, S.; González, R.; Muñoz, S.; Fernández-Mort, A.; Sánchez, C.; Marquardt, C. 2017. Basin Research 30: 1-31.
- Shaver, S.; Manske, S.; Currie, J.; Fahey, P.; Maya, J.; Stein, H.; Huard, J. 2009. Geological Society of America Annual Meeting, 26-7: 1 p.
- Somoza, R.; Ghidella, M. 2005. Revista Asociación Geológica Argentina 60 (4): 797-809.
- Tomlinson, A.; Blanco, N.; García, M.; Baeza, L.; Alcota, H.; Ladino, M.; Pérez de Arce, C.; Fanning, M.; Martin, M. 2012. Congreso Geológico Chileno, No. 13.

Anticlinal de Lari: Evidencia regional del lineamiento Olacapato – El Toro en la puna chilena

Javier Cortés², Ismael Murillo¹⁻³, Rafael Alarcón²

(1) SERNAGEOMIN, Santa María 104, Providencia, Chile

(2) DPI Ingenieros, Juan Moya 236, Ñuñoa, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El anticlinal de Lari es una estructura ubicada en la región de Antofagasta cerca de la frontera con Argentina, a los $\sim 23^{\circ}45'S$, en el occidente de la Puna andina. La observación de esta estructura se pudo reconocer a través de la reconstrucción paleogeográfica de las ignimbritas neógenas que conforman la cobertura y que fueron erosionadas por acción glacial. Los datos de rumbo y manteo con los que se reconstruyó la estructura corresponden a la disposición de las *fiammes* (textura eutaxítica) de las rocas superiores (ignimbritas Pampa Chamaca y Atana) y de estratos de rocas sedimentarias inferiores (Formación Siglias). La reconstrucción del anticlinal de Lari revela una particularidad que es su orientación NW-SE, que es distinta a la mayoría de los pliegues y fallas con lineamiento N-S en la zona. Tiene un carácter regional puesto que su extensión es de al menos 10 km y su ancho de 4 km. Se observa que su dirección de plegamiento tiende hacia el NE por lo que se presume que tiene un origen tectónico y de régimen compresivo. Temporalmente la estructura fue formada como una de las últimas en la zona ya que deforma a un anticlinal N-S originado previamente y como última unidad a la Ignimbrita Pampa Chamaca datada en $\sim 2,4$ Ma. Estructuras cercanas en la zona y de similar orientación han sido descritas en la Puna argentina como parte del lineamiento regional Calama – Olacapato – El Toro (COT) que posee una extensión de más de 100 km. Registro del lineamiento se ha observado en San Antonio de los Cobres (Provincia de Salta, Argentina) donde estudios indican que tiene un comportamiento de falla de rumbo sinistral; mientras que más al oeste, en la Puna argentina, se le ha asociado al emplazamiento de una serie de volcanes alineados NW-SE. No obstante, los estudios muestran este lineamiento en territorio chileno de manera exclusivamente inferida hasta la ciudad de Calama sin haber evidencias documentadas. La ubicación y particular orientación NW-SE del anticlinal de Lari, permiten integrar a la estructura como la parte más occidental, hasta la actualidad, del lineamiento mejor denominado Olacapato – El Toro. De esta forma, a diferencia de lo observado en la Puna argentina, el lineamiento en la zona de estudio se manifiesta como una estructura de carácter inversa y aparentemente con una componente de rumbo dextral.

Palabras Clave: Olacapato – El Toro, Puna, Geología Regional.

Control estructural del magmatismo Triásico Superior - Jurásico Inferior en la actual Cordillera de la Costa: La zona de cizalle dúctil del Plutón Bufadero, Parque Nacional Pan de Azúcar, Antofagasta

Matías Navea Jara¹, Rodrigo González T.¹, Cristopher López¹, Daniela Montenegro¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La actual Cordillera de la Costa del norte de Chile presenta sistemas estructurales paralelos a la fosa y en posición de intra arco; un ejemplo de aquello es el Sistema de Fallas de Atacama, ubicado en el antiguo arco magmático del Cretácico Inferior. Esta estrecha relación de estructuras corticales rumbos deslizantes y emplazamientos magmáticos, responde a una subducción oblicua del margen suroeste de Gondwana durante el Mesozoico. A medida que las estructuras acomodan la convergencia oblicua, estas van generando espacio en la corteza que es aprovechado por distintos cuerpos magmáticos. La transferencia calórica producida por el emplazamiento debilita la roca circundante haciéndola más susceptible a la deformación. En particular, las milonitas de intraarco son fundamentales para la comprensión de la deformación en la corteza a niveles medios e inferiores. Los distintos trabajos sobre milonitas buscan establecer, para una zona de cizalle dúctil, la cinemática, geometría, condiciones P-T, tiempo de deformación, entre otros, para comprender así, la dinámica del margen. De esta manera, la identificación de tectonitas y un análisis detallado en los aspectos mineralógicos, texturales, estructurales y de fábrica contribuyen significativamente al entendimiento de la deformación cortical.

En el sector norte del Parque Nacional Pan de Azúcar, al sur de Antofagasta (25°55' y 26°00'S), aflora la Diorita de Bufadero (Contreras et al., 2013). La edad del plutón es asignada para el Triásico Superior - Jurásico Inferior por Godoy Lara (1998), en base a correlaciones con los plutones Peralillo, Cerro Castillo y Barquito, de los cuales los dos últimos presentan edades datadas de 195.6 ± 2.4 Ma (Rb-Sr roca total), $193 \pm 3 / 204 \pm 4$ (K-Ar en biotita), respectivamente. Por otra parte, Contreras et al. (2013), describe a la unidad como "dioritas gnéisicas moderadamente foliadas, con evidencias de deformación plástica observable en lámina delgada". Sin embargo, se desconoce la génesis de la deformación de estas rocas y su relación con las principales estructuras expuestas en la zona, como, por ejemplo, el Sistema de Fallas Tigrillo reconocido al NE de la zona de estudio.

El presente trabajo entrega resultados sobre una zona de cizalle dúctil del Plutón Bufadero, a través de la recolección de datos estructurales en terreno, análisis estereográfico y análisis microestructural de milonitas. La interpretación estereográfica de mediciones de estratificación, foliación, lineación mineral y datum de fallas indican un acortamiento NO-SE que puede ser reconocido en 3 etapas: 1) deformación sinmagmática, 2) una deformación dúctil en facies anfíbolitas con lineaciones minerales subhorizontales y, por último, 3) una deformación frágil sobreimpuesta. Tales resultados indican una dirección de convergencia SE de placa de Phoenix durante el Triásico Superior - Jurásico Inferior.

Palabras Clave: milonita, zona de cizalle dúctil, Plutón Bufadero, Cordillera de la Costa.

Referencias:

- Contreras, J.P.; Espinoza, M.; De la Cruz, R.; Jorquera, R.; Kraus, S.; Ramírez, C.; Naranjo, J.A.; Escribano, J.; Martínez, P. 2013. Carta Cifuncho, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 161: 91 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Godoy, E.; Lara, L. 1998. Cartas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 5-6, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Análisis geométrico y cronológico de los sistemas estructurales al norte de los 33°S: Implicancias en la tectónica andina al norte y sur de la depresión Los Andes-San Felipe

Camilo Pérez Sánchez¹, Luisa Pinto Lincoñir¹, Mauricio Espinoza Vargas², Abigail Jackson-Gain¹

(1) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla #803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Las Heras 915, Concepción, Chile

Alrededor de los 33°S existe un cambio en la configuración morfoestructural de los Andes Centrales del Sur. Por un lado, la región central y sur de Chile (33°S-40°S), está dividida naturalmente en tres zonas geomorfológicas en franjas ~N-S fácilmente diferenciables (Boyce, 2015): Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. Mientras que hacia el norte de los 33°S estas divisiones geomorfológicas son difusas y la Depresión Central desaparece como rasgo importante, apareciendo de manera interesante la Depresión Los Andes-San Felipe (Carter y Aguirre, 1965). Este cambio morfoestructural entre los 32°S y 34°S está asociado al límite entre la subducción subhorizontal Pampeana y la zona de subducción normal, lo que a su vez está influenciado por la subducción de la dorsal de Juan Fernández (Barazangi y Isacks, 1976; Yáñez et al., 2002; Said, 2021). Por lo tanto, resulta interesante estudiar la disposición estructural de las unidades presentes en el límite Cordillera de la Costa y Cordillera Principal al norte de los 33°S para comprender la deformación de la región.

En este contexto, el presente estudio propone un primer modelo de evolución estructural para la franja justo al norte de la Depresión Los Andes-San Felipe, el cual se compara a los datos estructurales al sur de esta depresión. Para ello, se levantaron datos litológicos y estructurales presentes en la zona comprendida entre los 32°36'S y 32°48'S, con el fin de construir una sección balanceada de la región a través del software MOVE. A partir de esta sección, se propone una geometría, y cronología de evolución de los sistemas estructurales presentes. Finalmente, el modelo se comparó con los perfiles estructurales planteados por Fock (2005), Boyce (2015) y Machuca (2017).

Se propone que la deformación presente en el sector occidental de la zona de estudio corresponde a un sistema de inversión de vergencia este que tuvo lugar en el período Cretácico, y que afecta a las formaciones Veta Negra, Cerro Morado y Las Chilcas. Por otro lado, se identificó un sistema estructural de vergencia oeste en el sector oriental relacionado con la formación e inversión de la Cuenca Abanico, afectando el substrato volcano-sedimentario cretácico de las formaciones Cerro Morado y Las Chilcas, y a las secuencias volcano-sedimentarias Oligo-Miocenas de las formaciones Abanico y Farellones. Además, este sistema oriental tendrá actividad cuaternaria evidenciada por la deformación de morfologías en quebradas y depósitos sedimentarios cuaternarios.

Por lo tanto, podemos sugerir que la deformación se habría desplazado desde el oeste hacia el este entre el Cretácico y Cenozoico, y estaría relacionada a su vez con el desplazamiento del frente de depositación volcánico-sedimentario de la Formación Las Chilcas hacia el oriente (Jackson-Gain et al., este congreso). Además, proponemos que el frente de deformación en el borde occidental de la Cordillera Principal, al norte de la Depresión Los Andes-San Felipe, está situado más al oeste de lo que previamente se postulaba. Este frente estaría formado por un suave anticlinorio que se relaciona de manera coherente con un sistema de fallas inversas de vergencia oeste, localizadas inmediatamente al sur de la depresión.

Palabras Clave: Cordillera Principal, Dorsal de Juan Fernández, Depresión Los Andes - San Felipe, Frente de deformación, Sistema Estructural.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt Regular N°1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: A Mountain Building, así como a los ayudantes de terreno: Andrea, Javier y Paz. También a los estudiantes del ramo Geología de Campo I del semestre primavera 2022 de la Universidad de Chile.

Referencias:

- Barazangi, M., B.L. Isacks, 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology* 4: 606- 692.
- Boulder Boyce, D., 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile central durante el cretácico medio-tardío: El registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 304 p.
- Carter, W. y Aguirre, L., 1965. Structural Geology of Aconcagua province and Its relationship to the central Valley Graben, Chile. *Geological Society of América Bulletin* 76, pp. 651 -664.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile central entre los 33°S y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 179 p.
- Jackson-Gain, A., Pinto, L., Deckart, K., Pérez, C., este congreso. Geocronología y migración del evento de sedimentación de la Formación Las Chilcas del Cretácico medio a tardío evidenciado por nuevas edades 238U/206Pb en circones. *Actas, XVI Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile*.
- Machuca, C., 2017. Estratigrafía y estructuras de la Zona de Falla Pocuro entre los 32°30S y los 33°S. Memoria de Título (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Said, A., 2021. Definición del Límite entre las Unidades mesozoicas y cenozoicas en la vertiente occidental de Los Andes Centrales entre los 32° y los 33°S y su relación con la Zona de Falla Pocuro. Memoria de Título (No publicada), Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., Selles, D., 2002. The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca- Andean subduction system at 33-34°S: Geodynamic evidence and implications, *J. S. Am. Earth Sci.*, 15, 23-38.

Análisis de Facies y Evolución Magmática del Mesozoico en la Cordillera de la Costa, Chile Central (34°20'S - 34°00'S)

Catalina Pincheira¹⁻², Juan Arbea¹⁻², Christian Salazar²⁻³, Matías Peña³

(1) Universidad del Desarrollo, Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Plaza 680, Las Condes, Santiago, Chile

(2) GeoSalazar, Geología y Paleontología, Clotario Blest 4896, Macul, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

En el margen oriental de la Cordillera de la Costa de Chile central (entre los 32°20'S y 34°00'S) se reconocen unidades de edad Jurásica y Cretácica, compuestas principalmente por rocas volcánicas de composición intermedia y rocas sedimentarias, dentro de las cuales destacan las formaciones Horqueta, Lo Prado, Veta Negra y Las Chilcas, junto con cuerpos intrusivos cretácicos. Estas unidades representan la evidencia de arcos magmáticos y cuencas del Mesozoico, consideradas clásicamente como cuencas de antearco (e.g. Charrier *et al.*, 2014) y a su vez correlacionadas hacia el sur de los 34°00'S a partir de relaciones crono y litoestratigráficas únicamente en base a las unidades previamente mencionadas (e.g. Godoy *et al.*, 2009), en lugar de sus equivalentes identificados al sur de los 35°00'S (e.g. Corvalán, 1976; Morel, 1981; Bravo, 2001).

En la zona de San Vicente de Tagua Tagua y alrededores las unidades Mesozoicas identificadas previamente distan de su definición original (e.g. Godoy *et al.*, 2009; Contreras & Schilling, 2012). La Formación Lo Prado (Titoniano - Hauteriviense) presenta una variabilidad de facies muy amplia, que considera tanto la presencia de ambientes marinos transgresivos y regresivos como también ambientes continentales con depósitos volcánicos y volcanoclásticos, en contraste con las características que posee entre los 32°20'S y 34°00'S, donde se encuentra definida con un origen volcánico continental predominante (Thomas, 1985). Del mismo modo, el registro identificado como Formación Las Chilcas (Aptiano-Albiano) en el área de estudio corresponde a potentes sucesiones volcanoclásticas y volcánicas ácidas a intermedias de edad Albiano, en contraste con lo definido a los 32°50'S, donde los depósitos sedimentarios marcan el inicio de una fase tectónica compresiva (Boyce *et al.*, 2020), que se encuentra ubicada en la cuesta homónima.

En este estudio se discute a su vez las características de la cuenca de depositación para la Formación Lo Prado en la zona de estudio, ya que si bien se ha señalado en estudios previos que está asociada a una cuenca de antearco durante un período de extensión cortical, existen antecedentes en base a cálculos de volúmenes de rocas volcánicas de este período y las asociaciones de facies volcánicas, que muestran indicios de la presencia de cuencas de intra-arco (Vergara *et al.*, 1995), lo que no se descarta para esta unidad. Por otro lado, dado a que se ha identificado en estudios previos el desarrollo de actividad volcánica y depósitos sedimentarios entre el Triásico Superior y el Jurásico Superior en torno a la Cordillera de la Costa en Chile Central meridional, la determinación de la Formación Lo Prado como la unidad de mayor edad dentro de la zona de estudio (Jurásico Superior tardío a Cretácico Inferior temprano), también se constituye como objeto de discusión.

De esta forma, se evalúan las correlaciones e interpretaciones de acuerdo a la bibliografía y campañas de terreno realizadas, para concluir que la geología del área de estudio y alrededores se encuentra representada por las formaciones Rincón de Núñez, Alto de Hualmapu, La Lajuela y Estratos de Corcolén, la cual se define inicialmente en este trabajo, entregando edades que datan entre el Jurásico Inferior temprano y el Cretácico Inferior tardío. A su vez, se presentan sus equivalentes intrusivos, las unidades Complejo Plutónico Alhué e Hipabisal La Leona, a las cuales se les realiza una caracterización petrológica y evolutiva. De acuerdo a las interpretaciones, análisis y asociaciones de facies y análisis de geoquímica de roca total, se concluye la presencia de una cuenca de intra-arco durante la depositación de tres de las unidades mesozoicas con un mayor componente volcánico, la cual presenta variaciones a lo largo del Jurásico Inferior al Cretácico Inferior.

Palabras Clave: Petrografía, Intra-arco, Tectonoestratigrafía, Cretácico, Ambientes.

Agradecimientos: Agradecimientos a la Universidad del Desarrollo, Universidad Mayor, a la Fundación Añañuca y a los profesionales Dr. Francisco Fuentes Iza y Dr. Mauricio Calderón que apoyaron con su conocimiento.

Referencias:

- Boyce, D.; Charrier, R. & Farias, M. 2020. The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and structural analysis of Mid-Cretaceous deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39, 1-24.
- Bravo, P. 2001. Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los Ríos Mataquito y Maule, VII Región. Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, p. 106.
- Charrier, R. & Lillo, F. 1973. Geología regional y geoquímica del drenaje de las provincias de O'Higgins y Colchagua. Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales. 83 pp.
- Charrier, R.; Ramos, V.; Tapia, F. & Sagripanti, L. 2014. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31° and 37°S (Chile and Western Argentina). *Geological Society of London, Special Publications*, 399, 14-34.
- Contreras, J. & Schilling, M. 2012. Geología del área San Fernando - Curicó. Carta Geológica de Chile. Escala 1:100.000. Serie Geológica Básica, 50 pp.
- Corvalán, J. 1976. El Triásico y Jurásico de Vichuquén-Tilicura y de Hualañe, Prov. de Curicó. Implicaciones paleogeográficas. Primer Congreso Geológico Chileno. Santiago de Chile, 138-154.
- Godoy, E.; Schilling, M.; Solari, M. & Fock, A. 2009. Geología del área de Rancagua - San Vicente de Tagua Tagua. Carta geológica de Chile. Escala 1:100.000. Serie Geológica Básica No. 118, 52 pp.
- Morel, R. 1981. Geología del sector norte de la Hoja de Gualleco entre los 35°00' y 35°10' latitud sur. Provincia de Talca, VII Región, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica, 204 pp.
- Vergara, M.; Levi, B.; Nyström, J. & Cancino, A. 1995. Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension and subsidence in the Coast Range of central Chile. *GSA Bulletin*, 107, 1427-1440.

Análisis cinemático de las fallas en la cobertura meso-cenozoica de la Cordillera Principal de Chile central (33°49'S -34°14'S)

Tomas Piñeiro Pérez¹, Alfonso Encinas¹, Darío Orts²⁻³, Nicolás Henríquez¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile
(2) Universidad Nacional de Río Negro, Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología, Avenida General Roca 1242, General Roca, Argentina
(3) Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG). CONICET, Av. J. A. Roca 1242, 8332, General Roca, Río Negro, Argentina

Introducción

En el sector cordillerano de Chile Central (33°S) afloran las rocas de la cobertura meso-cenozoica que junto al arco magmático activo forman a la Cordillera Principal (CP). Esta morfoestructura se divide a su vez en dos dominios: la CP Oriental, compuesta por las rocas mesozoicas de la Cuenca Neuquina intensamente deformadas que representan a la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua, y la CP Occidental, compuesta por las rocas cenozoicas de la Cuenca de Abanico con pliegues suaves (Fock, 2005). Una serie de fallas son propuestas para explicar la deformación presente entre estos dominios, aunque existe debate sobre la temporalidad y los mecanismos de deformación (p.e. Armijo et al, 2010; Giambiagi et al, 2014). La zona de estudio está situada en los valles de los ríos El Volcán y Maipo. En este trabajo, se presenta una nueva base de datos estructurales con énfasis en los planos de falla observados en terreno.

Metodología

Se presentan 93 sets de datos estructurales obtenidos en 6 puntos de control ubicados en el límite entre los dominios occidental y oriental de la CP. En terreno se caracterizaron 3 variables: los planos de fallas, indicadores cinemáticos y sentido de movimiento y luego en gabinete fueron procesados con el software *FaultKin 11* donde se generaron las soluciones de los planos de falla de cada estación de medición. Esta metodología interpreta la orientación aproximada del esfuerzo principal máximo y mínimo con el fin de clasificar los conjuntos de fallas. Los resultados se compararon con estudios previos y se encontraron correlaciones con estructuras y unidades propuestas.

Resultados y discusión

En el Valle Las Arenas, se registraron 17 sets de datos en el contacto entre un intrusivo y la Fm Lo Valdés (Aguirre et al, 2009). Se observaron planos de falla subverticales con estrías perpendiculares al rumbo de estas, indicando un comportamiento de falla normal con extensión en rumbo N45°W. Estas estructuras se asocian al enfriamiento del cuerpo intrusivo en condiciones de deformación frágil. En Cajón El Morado, se registraron 9 sets de datos en el contacto entre las Fms Colimapu y Abanico, interpretado por Fock (2005) por falla. Los planos presentan una distribución NS y manteos de baja inclinación, indicando un comportamiento de falla inversa con compresión en dirección W-NW. En Baños Morales, se registraron 8 sets de datos estructurales en un intrusivo Mioceno (Calderón, 2008). Los planos de falla se presentan en rumbo NS con inclinaciones variables y muestran un comportamiento de falla normal con extensión E-NE°. Estas estructuras se pueden asociar al enfriamiento y extensión del plutón. En Paso de los Sapos, se registraron 16 sets de datos en el contacto entre las Fms Colimapu y Abanico (Thiele, 1980). Se observaron planos de falla NS con manteos variables, indicando un comportamiento de fallas normales y una extensión aproximada EW°. Una serie de diques y sills en el mismo rumbo fueron observados en terreno, que pueden estar relacionados a la deformación identificada. En Cajón Yesillo, se registraron 9 sets de datos cerca del contacto entre las Fms Colimapu y Abanico definido por falla (Thiele, 1980). Los resultados muestran un comportamiento de falla inversa con compresión en rumbo N50°W. Esto apoya la propuesta del autor con la presencia de una falla aunque la compresión es de dirección oblicua a la estructura propuesta. Finalmente, en el Cordón Río Blanco, se registraron 34 sets de datos en las rocas de la Fm Colimapu (Klohn, 1960). Los resultados obtenidos revelan dos familias de fallas, una con extensión en dirección N75°W y otra N40°E. Hasta el momento, no se han identificado estructuras de primer orden, pero sí se han identificado intrusivos y diapiros de yeso que podrían estar relacionados con su génesis. Otra posibilidad es que exista alguna estructura en la que los campos de esfuerzos roten hacia el este. Para comprender mejor esta zona, es necesario obtener más datos y realizar investigaciones adicionales.

Conclusiones

Las observaciones de la cinemática de estructuras a microescala, junto con la estratigrafía previa, permiten establecer una correlación entre las unidades aflorantes y la génesis de los planos de falla. Como resultado, se concluye que el comportamiento extensional es local y está relacionado con la presencia de diques o intrusivos en la zona. Por otro lado, el comportamiento compresivo se alinea con las fallas propuestas en el área de estudio, aunque se requiere continuar obteniendo datos para definir con precisión la geometría, extensión y distribución de las estructuras.

Palabras Clave: Tectónica Andina, Indicadores cinemáticos, Cordillera Principal, FaultKin, Geología estructural.

Financiamiento: Proyecto FONDECYT 1200428 "Tectono-stratigraphic evolution of the western Neuquén basin during the Early Jurassic-Late Cretaceous, central Chile, 33°-35°S".

Referencias:

- Aguirre, L., Calderón, S., Vergara, M., Oliveros, V., Morata, D., Belmar, M., 2009. Edades isotópicas de rocas de los valles Volcán y Tinguiririca, Chile central. XII Congreso Geológico Chileno.

- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., Kausel, E., 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, N° 29.
- Calderón, S., 2008. Condiciones físicas y químicas del metamorfismo de muy Bajo grado de las secuencias mesozoicas en el valle del Río Volcán (33°50'-34°00's); Memoria de título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S. Tesis de grado de Magíster en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile.
- Giambiagi, L., Tassara, A., Mescua, J., Tunik, M., Alvarez, P., Godoy, E., Hoke, G., Pinto, L., Spagnotto, S., Porras, H., Tapia, F., Jara, P., Bechis, F., García, V., Suriano, J., Maris Moreiras, S., Pagano, S., 2014. Evolution of shallow and Deep structures along the Maipo – Tunuyán transect (33°40' S): from the Pacific coast to the Andean foreland. Geological Society, London, Special Publications.
- Kohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, N° 8.
- Thiele, R., 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica N° 29.

Geomorphological evidence of neotectonic activity in the transition Puna Plateau-Frontal Cordillera and Precordillera (27°30'S) using high-resolution UAV-Based DEM and fieldwork

Rodrigo Quiroga Carrasco¹⁻², S. Perroud³⁻⁴, L. Giambiagi¹, J. Mescua¹⁻⁵, G. De Pascale³

(1) Grupo de Tectónica, IANIGLA, CCT Mendoza, CONICET. E-mail: rquiroga@mendoza-conicet.gob.ar

(2) Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Potsdam, Germany

(3) Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) Incaic Exploration Spa, Paseo Ahumada 236, Santiago, Chile

(5) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo

In the Southern Central Andes, at 27°30'S, the Puna Plateau, the Cordillera Frontal, northern Famatina Range, and northwestern Sierras Pampeanas are the first order morpho-structural units that conform the Andean orogen in Argentina.

Our work focuses on the study of the Quaternary deformation affecting these morpho-structural units and seeks to contribute to the understanding of the spatio-temporal evolution of the deformation recorded along the Valle Maricunga belt-Valle Ancho areas (Southwest Puna Plateau), the Fiambalá Basin and the Caschuil valley (Precordillera) and the Cajón - Arenal basin (Northwest Sierras Pampeanas areas). To achieve this goal, we carried out: (1) a detailed structural mapping of these selected areas, and (2) UAV-photogrammetry to generate high-resolution digital elevations models in areas where lineaments identified with Google Earth affect Pleistocene to recent non-consolidated deposits.

Results of the geomorphologic analysis in deformed Pleistocene-Holocene sequences in the Southwest Puna, show Pleistocene lava flows and fluvial-alluvial terraces with a principal sub-horizontal component of displacement along high-angle structures with NW-SE orientation, parallel to the main structures affecting the area. We interpret these structures as active strike-slip faults with sinistral displacement. On the other hand, terraced alluvial fans in the northern Famatina Range, Fiambalá basin, and Sierras Pampeanas are affected by N-S-trending, west-vergent reverse faults that uplift Pliocene-Pleistocene sequences over these non-consolidated deposits, developing a series of knick points that produce a systematic interruption of active streams. Our results suggest that Southwest Puna, the Precordillera and Sierras Pampeanas are currently under different strain regimes. In the Southwest Puna, active strike-slip faults indicate a transpressional deformation, whereas in Precordillera, deformation is characterized by contractional and transtensional deformation, and, finally, in the northwestern Sierras Pampeanas, contractional deformation dominates.

Keywords: Quaternary strain field, southern Puna plateau, Valle Ancho, northern Famatina, Sierras Pampeanas.

Evolución del campo de esfuerzos en límite sur de la Puna, durante el Cenozoico Tardío (26°30'-27°40' S)

Rodrigo Quiroga Carrasco¹⁻⁶, Laura Giambiagi¹, Andrés Echaurren González¹, Julieta Suriano¹, Guillermo Fuentes²⁻³, Matías Peña⁴⁻⁵, Manfred Strecker⁶

(1) Grupo de Tectónica, IANIGLA, CCT Mendoza, CONICET, Argentina

(2) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Ejército 146, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(3) Incaic Exploration Spa, Paseo Ahumada 236, Santiago, Chile

(4) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Santiago, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(6) Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam, Germany

Se presenta un análisis estructural utilizando 86 tensores de paleoesfuerzos que documentan la evolución espacio-temporal del campo de esfuerzos desde los últimos 24 Ma a lo largo del margen sur del plateau de la Puna, en transición con las áreas de la Cordillera Frontal, Famatina y Sierras Pampeanas. Los tensores de paleoesfuerzos se obtuvieron utilizando el software Wintensor (Delvaux y Sperner, 2003), analizando ~1.000 datos de deslizamiento de falla y obteniendo subconjuntos de datos mecánicamente compatibles y homogéneos. Estas direcciones de compresión son comparadas con observaciones de campo que pueden ayudar a identificar la edad de los diferentes eventos deformacionales en conjunto con los esfuerzos, considerando las edades absolutas y relativas de las unidades estratigráficas deformadas y no deformadas y las relaciones de corte entre las fallas analizadas. Para dilucidar la implicancia regional de este análisis, combinamos los resultados con mapeo estructural regional, secciones balanceadas modeladas con MOVE 2D y 4 edades U-Pb.

Los resultados muestran que en el límite occidental entre la Puna y la Cordillera Frontal se inició una compresión E-O después del Oligoceno tardío y continuó hasta el Mioceno medio, inferida a partir de 1) Una nueva edad U-Pb de ~13 Ma determinada a partir una capa subhorizontal sin evidencias de deformación contraccional, que cubre las rocas deformadas del Eoceno tardío-Oligoceno temprano, 2) Dado que estas estructuras no están afectadas por fallas normales documentadas durante el Oligoceno, este régimen compresivo es posterior al Oligoceno temprano. Las estructuras relacionadas con este evento están afectadas por un régimen tectónico transcurrente, generando un sistema NO-SE de fallas de alto ángulo con desplazamiento sinistral.

En el límite central entre la Puna y Famatina, se documenta una compresión E-O que comenzó en el Mioceno y continuó hasta el Plioceno, relacionada con el desarrollo de un sistema contraccional tipo faja plegada y corrida de rumbo N-S, con vergencia oriental. La compresión cambió de E-O a N-S después del Plioceno medio (~3 Ma), afectando a la zona norte en transición hacia la Puna. En el borde NO de la Sierras Pampeanas, en transición con la Puna, la compresión fue activa en el Mioceno, y desde el Plioceno temprano-medio (~5), una compresión N-S y transurrencia fueron el campo de esfuerzos que predominaron en todo el borde entre estas dos unidades morfotectónicas.

Por último, en las zonas elevadas del borde suroriental del plateau, las estructuras inversas que afectan a las secuencias del Mioceno medio a superior sugieren una deformación por compresión E-O, afectadas por transurrencia. La deformación transcurrente pareciera ser el evento mayormente predominante desde los ~5 a 3 Ma y documenta una extensión N-S que va en concordancia con estudios previos (por ejemplo, Montero et al., 2010 y Schoenbohm y Strecker, 2009).

A escala regional, el análisis de paleoesfuerzo permite asociar tres procesos orogénicos mayores implicados en la evolución de los Andes Centrales a esta latitud: (1) La compresión E-O documentada desde el Oligoceno tardío hasta el Mioceno medio en el área, estaría involucrado en el desarrollo de estructuras responsables de una primera etapa de la construcción orogénica, engrosamiento y crecimiento de la corteza; (2) El inicio de un régimen de transcurrente desde los ~13 Ma en el borde occidental de la Meseta de la Puna y compresión y transurrencia en su borde oriental, indicaría una etapa transicional hacia (3) un régimen transcurrente generalizado como resultado del aumento del esfuerzo vertical durante los eventos previos de deformación contraccional y engrosamiento cortical, generando un incremento de la energía potencial gravitatoria. La predominancia de un régimen transcurrente en la última etapa de evolución del campo de esfuerzo podría indicar que el borde sur del plateau de la Puna se encuentra en una etapa de equilibrio, en donde la deformación y engrosamiento de la corteza se propaga lateralmente, mientras que internamente la deformación se resuelve a través de estructuras transcurrentes.

Palabras Clave: Extremo sur del plateau de la Puna, Campo de esfuerzo.

Financiamiento: Esta investigación contó con el apoyo de los proyectos argentinos Foncyt PICT-2016-0269 y PICT-2019-0800, el proyecto CONICET PIP 11220200101409CO, el Proyecto Strategy (CONICET-DFG, International Research Training Group-Argentina-Germany) y el programa de becas de corta duración del Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD).

Agradecimientos: El libre acceso al software WinTensor (Dr. D. Delvaux); la licencia MOVE 2D (PETEX) para la FCEN-UNCUYO; y el software Stereonet (Dr. R. Allmendinger).

Referencias:

- Delvaux, D. and Sperner, B. 2003. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: New Insights into Structural Interpretation and Modelling (D. Nieuwland Ed.). Geological Society, London, Special Publications, 212: 75-100.
- Montero Lopez, M.C., Hongn, F.D., Strecker, M.R., Marrett, R., Seggiaro, R. and Sudo, M. 2010. Late Miocene–early Pliocene onset of N–S extension along the southern margin of the Central Andean Puna Plateau: Evidence from magmatic, geochronological and structural observations. *Tectonophysics*, 494: 48–63.
- Mpodozis, C., Clavero, J., Quiroga, R., Droguett, B. and Arcos, R. 2019. Carta Nevados de Jotabache, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 200, 86 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Quiroga, R., Peña, M., Poblete, F., Giambiagi, L., Mescua, J., Gómez, I., Echaurren A., Perroud S., Suriano J., Martínez F., Espinoza D. 2021. Spatio-temporal variation of the strain field in the southern Central Andes broken-foreland (27°30'S) during the Late Cenozoic, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 106, 102981.
- Schoenbohm, L.M. and Strecker, M.R. 2009. Normal faulting along the southern margin of the Puna Plateau, northwest Argentina. *Tectonics*, 28. TC5008, [doi:10.1029/2008TC002341](https://doi.org/10.1029/2008TC002341).

Estructura de resistividad eléctrica en el Sistema de Falla de Pocuro: Nuevos antecedentes geofísicos para caracterizar el sistema de falla en profundidad

Felipe Reyes Córdova¹, Pablo Alarcón Pinto¹, Luisa Pinto Lincoñir², José Tomás Urrejola Sanhueza², Andrés Stuardo¹, Cristián Roncagliolo Belmar¹, Daniela Montecinos-Cuadros¹

(1) Geo Resource Ltda., Chillán, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

El Sistema de Falla Pocuro (SFP; Rivano et al., 1993) constituye un sistema estructural ~NS distinguible entre los 32 y 33°S, por medio de varias trazas de falla ubicadas en el borde occidental de la Cordillera Principal. Su actividad Oligo-Miocena se vincula al desarrollo de la Cuenca Abanico, en su etapa extensional e invertida, mediante fallas normales invertidas de manteo al este (Charrier et al., 2015). Asimismo, el SFP es responsable de una intensa alteración hidrotermal y de una extensa red de estructuras secundarias evidenciadas en terreno. En su segmento del borde oriental de la Depresión Los Andes-San Felipe, entre el Estero San Francisco y el Río Aconcagua, destaca el Sistema de Fallas Cariño Botado como parte de la actividad cuaternaria del SFP (Estay et al., en prensa). En este sector, se reconocen andesitas y tobas líticas-cristalinas muy alteradas de la Formación Abanico cabalgando a depósitos aluviales cuaternarios.

Para entender la arquitectura de este sistema estructural en profundidad, durante el 2021 se realizó la adquisición de 10 estaciones de magnetotelúrica (MT) organizadas en dos perfiles de orientación O-E de 2,5 km de largo que cruzan el SFP, específicamente en el Estero San Francisco y en la localidad de Llano Norte. Estas fueron procesadas utilizando una implementación del algoritmo robusto de Egbert y Booker (1986) para la obtención del tensor de impedancia y los vectores de inducción. Fue posible recuperar información entre 10^{-4} y 10^0 s, aunque la calidad de datos es menor en las estaciones ubicadas en la Depresión Central, producto de un mayor nivel de ruido cultural.

Con los datos obtenidos se han podido realizar modelos preliminares 2D de resistividad eléctrica (Rodi y Mackie, 2001) a lo largo de ambos perfiles. Los modelos sugieren la presencia de una capa de resistividad eléctrica variable (entre 10 - 700 Ω m) en los primeros ~800 m, lo que se podría relacionar con el desarrollo de alteración hidrotermal y fracturamiento, con distinto grado de intensidad, en la unidad reconocida en superficie como Formación Abanico. Bajo esto, es posible identificar una zona de mayor resistividad eléctrica (>1.000 Ω m). Este contraste podría ser indicio de la ocurrencia de una unidad distinta a la Formación Abanico, posiblemente la unidad cretácica subyacente. Finalmente, es posible observar que la resistividad de esta unidad disminuye en el margen de la Cordillera Principal, lo que podría ser coherente con la presencia de una zona de daño asociada con el SFP en el área de estudio, causando un debilitamiento del basamento por la ocurrencia del sistema estructural.

Palabras Clave: Sistema de Falla Pocuro, Magnetotelúrica, Exploración geofísica, Cuenca de Abanico.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt 1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: A la comunidad Estero San Francisco y Llano Norte, en especial a C. Quiroga, A. Jackson-Gain y A. Canales, por su ayuda en la adquisición de datos; y a D. Díaz y P. Jara por sus valiosas discusiones.

Referencias:

- Charrier, R., Ramos, V., Tapia, F., Sagripanti, L., 2015. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37°S (Chile and Western Argentina). In Sepúlveda, S.A., Giambiagi, L.B., Moreiras, S. M., Pinto, L., Tunik, M., Hoke, G.D., Farías, M. (Eds.), *Geodynamic Processes in the Andes of Central Chile and Argentina*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 399.
- Egbert, G. & Booker, J. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal International*, Vol. 87, Issue 1.
- Estay, J., Pinto, L., Easton, G., De Pascale, G.P., Troncoso, M., Carretier, S., Forman, S.L., (en prensa). Active thrust tectonics along the western slope of the Central Andes southernmost Pampean flat-slab segment (~33°S, Chile): the Cariño Botado fault system. *Geomorphology*.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., Espiñeira, D., 1993. Hojas Quillota y Portillo, V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Mapa 73, escala 1:250.000.
- Rodi, W., & Mackie, R. L. ,2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1).

Termocronología (U-Th)/He de la vertiente occidental de los Andes (36°S) y su relación con la evolución tectónica Cenozoica

Camila Rivera Ormeño¹, Mauricio Espinoza¹⁻³, Julie Fosdick², Megan Mueller²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290. Casilla 160-C, Concepción, Chile
 (2) University of Connecticut, Department of Earth Sciences, 354 Mansfield Road, U-1045, Storrs, CT 06269, Connecticut, United States of America
 (3) Millennium Nucleus the Seismic Cycle Along Subduction Zones, Valdivia, Chile

El estilo estructural de los Andes Centrales del Sur (18-40°S) se ha planteado como un reflejo de la subducción, que ha permanecido desde el Jurásico temprano y ha provocado cambios importantes en el régimen de esfuerzos en el margen andino (Charrier et al., 2002). El levantamiento orogénico en esta zona ocurre esencialmente por el acortamiento cortical dado el fallamiento y plegamiento asociado a la inversión tectónica de cuencas durante periodos compresivos, las cuales fueron formadas en contextos de extensión (Jordan et al., 2001).

Tradicionalmente se ha propuesto la existencia de un periodo de deformación extensional localizado en el sector occidental de la Cordillera Principal de Chile Central durante el Eoceno tardío y Mioceno temprano, evidenciado por el desarrollo de la cuenca de Abanico (Charrier et al., 2005). Esta cuenca de intra-arco se desarrolló sobre un basamento Mesozoico deformado y erosionado entre los 33 y 36°S, y concentra los depósitos volcánicos y rocas plutónicas del Cenozoico. Su existencia se prolongó hasta principios del Mioceno, aunque la edad exacta del periodo extensional registraría un diacronismo latitudinalmente (Charrier et al. 2002), tras lo cual habría comenzado la contracción y la inversión tectónica, marcando el inicio de la orogenia moderna de Chile Central según algunos autores (Charrier et al., 2005, Jordan et al. 2001). Por otro lado, investigaciones recientes evidencian la existencia de una segmentación a escala regional a lo largo de la cuenca, lo que implicaría diferencias en las historias de deformación durante la inversión tectónica (Piquer et al., 2017). Lo anterior nos lleva a la siguiente interrogante, ¿Cuál es la temporalidad de la deformación, tanto extensional como compresional en la vertiente occidental de los Andes a los 36°S?

Hasta el momento, no existen investigaciones publicadas que aborden específicamente la temporalidad de los procesos de generación de cuenca y deformación neógena de la vertiente occidental de los Andes en la Región del Maule, a los 36°S. El presente trabajo intenta responder a esta interrogante mediante el análisis de la historia de enfriamiento y exhumación de las láminas estructurales que participan de la deformación. Esta historia termal se obtiene a partir de resultados de termocronología de baja temperatura (U-Th)/He en circones y apatitos presentes en plutones cretácicos (85-90 Ma) y miocenos (18-14 Ma), y en las unidades detríticas del Cretácico (Formación Las Chilcas) y del Mioceno (Formación Colbún) que afloran en el área de interés. El método se basa en la medición de la acumulación de ⁴He procedente de la desintegración α del U y Th en ciertos minerales accesorios (Donelick et al., 2005); cada mineral estudiado proporciona información sobre el historial térmico en un rango de temperatura específico, entre 40 y 120°C en el caso del apatito y de 220 a 140°C en circones. Al someter los resultados a un modelamiento inverso utilizando el software HeFTy, se obtienen trayectorias de temperatura y tiempo. Estas historias termales brindan la oportunidad de evaluar el momento, la magnitud y la duración de los eventos térmicos, que pueden ser asociados a ciertos procesos geológicos de la corteza superior (Spikings et al., 2008; Flowers et al., 2022). Esta metodología ha sido utilizada previamente para cuantificar la historia de exhumaciones neógenas de otras áreas de la Cordillera Principal (Spikings et al., 2008).

Los nuevos resultados termocronológicos serán integrados con la información geocronológica, termocronológica y geológica disponible para la zona. Al combinar la interpretación de la historia termal con el registro estructural de la región y la actividad neotectónica en el frente cordillerano, podría lograrse una comprensión de los procesos de construcción orogénica y el arreglo estructural a gran escala de la vertiente occidental de los Andes a estas latitudes.

Palabras Clave: Termocronología, Cuenca de Abanico, Formación de cuenca, Inversión tectónica.

Referencias:

- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., ... & Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 117–139.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J. J., Iturra, N., ... & Wyss, A. R. (2005). The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 43-77.
- Donelick, R. A., O'Sullivan, P. B., Ketcham, R. A., Reiners, P. W., & Ehlers, T. A. (2005). Low-temperature thermochronology: techniques, interpretations, and applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58, 49-94.
- Flowers, R. M., Zeitler, P. K., Danišik, M., Reiners, P. W., Gautheron, C., Ketcham, R. A., ... & Brown, R. W. (2023). (U-Th)/He chronology: Part 1. Data, uncertainty, and reporting. *Bulletin*, 135(1-2), 104-136.
- Jordan, T. E., Burns, W. M., Veiga, R., Pángaro, F., Copeland, P., Kelley, S., & Mpodozis, C. (2001). Extension and basin formation in the southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics*, 20(3), 308-324.
- Piquer, J., Hollings, P., Rivera, O., Cooke, D. R., Baker, M., & Testa, F. (2017). Along-strike segmentation of the Abanico Basin, central Chile: New chronological, geochemical and structural constraints. *Lithos*, 268, 174-197.
- Spikings, R., Dungan, M., Foeken, J., Carter, A., Page, L., & Stuart, F. (2008). Tectonic response of the central Chilean margin (35–38°S) to the collision and subduction of heterogeneous oceanic crust: a thermochronological study. *Journal of the Geological Society*, 165(5), 941-953.

Fault-Driven Differential Exhumation in a Transpressional Tectonic Setting: A Combined Microstructural and Thermochronologic Approach From the Liquiñe-Ofqui Fault System, Southern Andes (39°S)

Tomás Roquer¹⁻², Gloria Arancibia¹⁻²⁻³, Nikki M. Seymour⁴⁻⁵, Eugenio E. Veloso¹⁻², Julie Rowland⁶, Daniel F. Stockli⁷, Niels Jöns⁸, Diego Morata²⁻⁹

- (1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Chile, CEGA - Andean Geothermal Center of Excellence, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile
 (3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Investigación en Nanotecnología y Materiales Avanzados, Santiago, Chile
 (4) Stanford University, School of Earth, Energy and Environmental Sciences, California, United States
 (5) University of California Santa Cruz, Department of Earth and Planetary Sciences, California, United States
 (6) The University of Auckland, School of Environment, Auckland, New Zealand
 (7) The University of Texas at Austin, Department of Geological Sciences, Texas, United States
 (8) Ruhr-Universität Bochum, Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Bochum, Germany
 (9) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

This abstract is based on the published paper by Roquer et al. (2023) in the journal *Tectonics*.

Crustal deformation in transpressional tectonic settings is partitioned across fault-bounded tectonic blocks, where the boundaries may serve as favorable zones for enhanced rock exhumation. We conducted field and petrographic analysis, geothermobarometry, zircon U-Pb geochronology, and zircon and apatite (U-Th)/He thermochronology on intrusive and metamorphic rocks to investigate exhumation patterns of fault blocks delimited by the Liquiñe-Ofqui Fault System (LOFS) in the Southern Andes (39°S). Our integrated analyses provide insights into the relative influences of magmatism, fault-driven differential exhumation, and fault-controlled geothermal flow along the LOFS. Magmatic events were concentrated during the Early to Late Jurassic (182–151 Ma), Early Cretaceous (116–104 Ma), and Miocene (17–6 Ma) periods. Dextral mylonitic deformation likely occurred concurrently with the Miocene magmatic pulse. Tectonic exhumation took place across a positive flower structure during the Late Miocene to Early Pleistocene (6–2 Ma), affecting kilometer-scale tectonic blocks bound by N-striking, steeply dipping faults of the LOFS. Fault-controlled geothermal flow persisted from the Early Pleistocene to the present-day (1.5 Ma-present). Our findings suggest that individual faults not only facilitate the exhumation of tectonic blocks but also act as conduits for long-term hydrothermal fluid flow. The coeval occurrence of dextral mylonitic deformation with the Miocene magmatic pulse indicates a possible relationship between the two processes. The Late Miocene to Early Pleistocene tectonic exhumation, characterized by uplift and erosion of kilometer-scale fault blocks, was driven by a transpressional tectonic regime. Additionally, fault-controlled geothermal flow contributed to the long-term fluid circulation along the LOFS. Understanding the interplay between faulting, exhumation, and hydrothermal processes is crucial for deciphering the complex tectonic evolution of the Southern Andes. Our study provides valuable insights into the fault-controlled differential exhumation mechanisms and long-term fluid flow pathways in transpressional tectonic settings. Further investigations combining detailed structural analysis, geochronology, and fluid flow modeling will enhance our understanding of the intricate interactions between faulting, exhumation, and hydrothermal systems in tectonically active regions such as the Southern Andes.

Keywords: Southern Volcanic Zone, Geochronology, Thermobarometry, North Patagonian Batholith.

Financing: This research was funded by the National Agency for Research and Development (ANID), through the programs ANID-FONDECYT, Project 1180167; and ANID-FONDAP, Projects 15090013 and 15200001. Tomás Roquer acknowledges support from the ANID Scholarship Program, Beca de Doctorado Nacional 21171178. Nikki Seymour acknowledges support from the National Science Foundation EAR Postdoctoral Fellowship Award 1952764.

References:

- Roquer, T., Arancibia, G., Seymour, N. M., Veloso, E. E., Rowland, J., Stockli, D. F., et al. (2023). Fault-driven differential exhumation in a transpressional tectonic setting: A combined microstructural and thermochronologic approach from the Liquiñe-Ofqui Fault System, Southern Andes (39°S). *Tectonics*, 42, e2022TC007229. <https://doi.org/10.1029/2022TC007229>.

Control estructural en la circulación de fluidos corticales y en la formación del relieve en la Cordillera de la Costa de los Andes Centro-Sur (35-37°S)

Tomás Roquer¹, Paulina Vergara¹, Nicolás Bustos¹, Katherine Toro¹, Carlos Marquardt¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Escuela de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

En la Cordillera de la Costa del centro-sur de los Andes chilenos (35-37°S), se realizó un estudio para investigar el papel del control estructural en la circulación de fluidos, la formación del relieve y la génesis de los pediplanos. Se llevó a cabo un levantamiento estructural de campo para analizar detalladamente las características geológicas y estructurales, y así comprender el papel del control estructural en la circulación de fluidos, la formación del relieve y la génesis de los pediplanos. Los resultados preliminares sugieren tres etapas distintas en la evolución tectónica. En la primera etapa, se observó un magmatismo sintectónico y la formación de zonas de cizalle sinplutónicas frágil-dúctiles con orientación N-S a NE-SW. Estas estructuras se relacionaron con el emplazamiento de los intrusivos carboníferos del Batolito de la Costa. El estado de deformación de largo plazo durante esta etapa fue transpresivo. En la segunda etapa, se produjo un magmatismo sintectónico y la formación de cuencas sedimentarias continentales. Se identificaron zonas de cizalle sinplutónicas frágil-dúctiles con orientación NW-SE a WNW-ESE. El estado de deformación de largo plazo durante esta etapa fue transtensivo. En la tercera etapa, se observó una reactivación frágil de las zonas de cizalle sinplutónicas con orientación N-S a NE-SW y NW-SE a WNW-ESE. Durante esta etapa, se formaron vetillas de cuarzo-(calcita-zeolita). El estado de deformación de largo plazo durante esta etapa también fue transtensivo. Además de estas etapas tectónicas, se identificaron áreas donde las fallas regionales limitan los pediplanos en la Cordillera de la Costa. Estas áreas restringidas sugieren un control estructural significativo en la formación de los pediplanos en la región. Estos hallazgos resaltan la importancia del control estructural en la circulación de fluidos, la formación del relieve y la génesis de los pediplanos en la Cordillera de la Costa del centro-sur de los Andes chilenos. Un mayor análisis de estas estructuras permitirá una mejor comprensión de los procesos geológicos y geomorfológicos en esta área.

Palabras Clave: Batolito de la Costa, Geología Estructural, Fallas Transversales a los Andes.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por proyectos internos de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), y de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC).

Análisis de la sismicidad de Los Andes patagónicos Australes, al este del Punto Triple de Chile

Melisa Isabel Rodríguez¹⁻², Silvana Spagnotto³⁻⁴⁻⁵, Federico Miguel Dávila¹⁻², Augusto Morosini³⁻⁴

(1) Universidad Nacional de Córdoba, Av. Haya de la Torre s/n, Pabellón Argentina, Córdoba (Capital), Argentina

(2) Universidad Nacional de Córdoba, CONICET (CICTERRA), Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba (Capital), Argentina

(3) Universidad Nacional de San Luis, Ejército de Los Andes 950, San Luis (Capital), Argentina

(4) CONICET, Almt. Brown 907, San Luis (Capital), Argentina

(5) Universidad de Buenos Aires, Viamonte 430, Buenos Aires, Argentina

El área de estudio se localiza entre las coordenadas 45°-48°S y 69°-75°O, dentro de territorio argentino como chileno, involucra la zona de antearco, arco, y antepaís de los Andes Australes sector que contiene una conjugación de tres placas tectónicas, las placas oceánicas Antártica y Nazca, y la placa Sudamericana. La zona de intersección de las 3 placas se conoce como el Punto Triple de Chile (PTC, Gorrington et al. 1997). Por otro lado, entre las placas oceánicas mencionadas anteriormente se encuentra la Dorsal Sísmica del Sur de Chile (DSSC), que subduce por debajo del continente sudamericano a los 46.09°S (posición geográfica actual del PTC, Suárez 2021), dando lugar al desarrollo de una ventana astenosférica por debajo de la placa Sudamericana (Breitsprecher y Thorkelson, 2009), producto de la diferencia en las tasas de subducción de ambas placas oceánicas (DeMets et al. 1994). Esta ventana, permite el paso directo de material caliente proveniente del manto, generando altos flujos calóricos en el sector (Ávila y Dávila, 2018), ocasionando particularidades sobre el continente, como por ejemplo ascensos anómalos de la corteza dando lugar a mesetas elevadas, deformación extensional de arco y retroarco proximal (Scalabrino et al. 2011), emanaciones de basalto de retroarco (tipo OIB) sin deformación (Gorrington et al. 1997), y una significativa tasa de exhumación no acompañada por deformación cortical (Georgieva et al. 2019), silencio volcánico de arco y un silencio sísmico pronunciado entre 45°-55°S en el cinturón Patagónico desde el Mioceno tardío. Esto último disminuye gradualmente hacia el antepaís extrandino, llegando a ser casi inexistente (Stern 2004; Suárez 2021).

Las localizaciones de sismos reportadas en la literatura muestran que la mayor parte de la actividad se concentra en las fallas transformantes oceánicas y en la zona del arco (Agurto-Detzel et al. 2014), especialmente en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ) considerada una estructura de primer orden que se encuentra en la zona (Lange et al. 2008) la cual acomoda la mayor parte de la deformación ejercida por fuerzas desde el Pacífico y Atlántico. Además, se han reportado eventos relacionados con la ruptura de glaciares y actividades antrópicas (Agurto-Detzel et al. 2014), que también fueron discutidos en este trabajo.

En este estudio se analizó la sismicidad en el antearco, arco y antepaís al este del Punto Triple Chileno (PTC), partiendo de registros continuos de dos redes de estaciones sismológicas (identificadas con el código XJ e YJ), que funcionaron durante los años 2004 y 2005. Los datos seleccionados se encuentran disponibles en www.iris.edu, y pueden descargarse utilizando las aplicaciones de *Breq Fast*, y *Wilber 3.0*. Los datos provienen de más de 100 estaciones de banda ancha y período corto, instaladas en regiones de difícil logística y condiciones climáticas, y es por ello que hay periodos de tiempo en donde no todas funcionaron, y los registros son pocos homogéneos, principalmente durante los meses de invierno. En algunos casos, algunos eventos solo fueron registrados por una decena de estaciones.

La caracterización de cada sismo ayudó a determinar el origen de la sismicidad y su vínculo o no con procesos tectónicos, y si existe relación entre las fuentes sismológicas y los elementos estructurales presentes, a partir del estudio de mecanismos focales.

Por otro lado, se analizaron mecanismos focales reportados en la bibliografía y en catálogos CMT (*Centroid Moment Tensor*), y PDE (*Preliminary Determination of Epicenters*), ocurridos desde la década del 70, y en particular se analizó el sismo de Mw 4,9 de la localidad Las Heras, Santa Cruz, localizado al este del cinturón en el antepaís.

Del total de los registros se seleccionaron sismos en base a su magnitud, posición geográfica, y cantidad de estaciones que registró cada evento, y se procesaron con el software SEISAN (*Seismic Analysis System*). Se determinaron manualmente los tiempos de llegada de las ondas P y S, la polaridad de la onda P y la magnitud coda (Mc). Se relocalizó un total de 25 eventos, de los cuales se pudieron determinar 14 mecanismos focales. Como el método lleva implícita la ambigüedad entre el plano real y el plano nodal, la falla puede ser cualquiera de los dos planos nodales, y solamente viendo los datos sismológicos no podemos determinar cuál es el plano de falla. La elección del plano requiere datos estructurales observados en la zona de estudio o cartografía de la región.

Para la obtención de estos resultados, se utilizó el modelo de velocidad local 1-D tomado de Agurto-Detzel et al. (2014), y se determinó la magnitud coda (Mc). Se obtuvieron valores en el rango de 1 a 2,8 (con excepción del sismo de Las Heras, que posee una magnitud momento (Mw) de 4,9), y se ubicaron profundidades hipocentrales máximas de 25 km.

En el total de los mecanismos obtenidos, se pueden observar fallamientos normales y de rumbo en la zona circundante al volcán Hudson, fallamientos de rumbo, normales e inversos sobre el trazo de la LOFZ asociados al movimiento dinámico de la falla. Por otro lado, se destacan dos sismos (Ver Figura N°1, sismo 10 y 25): el primero se encuentra asociado a una explosión y el segundo, normal, se localiza en la región extraandina de baja sismicidad, donde pudimos vincularlo con sismicidad inducida, por procesos de fracturamiento hidráulico. Otros sismos normales aislados, como los que se encuentran al sur del Lago Buenos Aires, podrían estar asociados con la ventana astenosférica, y generar zonas de colapso y sistemas distensivos. Por último, dos fallamientos de rumbo hacia el oeste sobre el océano, que podrían estar vinculados a la DSSC y sus fallas transformantes asociadas.

Los mecanismos calculados y analizados en este trabajo fueron asociados con los elementos estructurales presentes en superficie en la zona de estudio, dando lugar a las siguientes conclusiones.

Mecanismos asociados al volcán Hudson (eventos N° 1, 4, 11, 12, 14):

El volcán Hudson, es considerado una caldera volcánica de 10 km de diámetro, se encuentra al sur de del Puerto Aysén y al norte del Campo de Hielo Norte.

De acuerdo a las formas de onda observadas, donde las señales de las ondas P y S son nítidas, analizamos 5 sismos volcano-tectónicos, los cuales resultaron ser de carácter extensivo. La sismicidad se desarrolla por arriba de los 12 km, y particularmente por encima de los 5 km.

Los mecanismos focales de los sismos poseen un vínculo directo con la forma de la caldera y las fallas reportadas por Muñoz-Zapata (2020) y lineamientos tanto regionales como locales reportados por Gutiérrez (2005), ya que los rumbos coinciden con las fallas y poseen los ángulos de inclinación típicos de sismos normales. Estos sistemas de fallas y fracturas fueron usados en diferentes episodios como canales de los fluidos magmáticos y podrían vincularse a un sistema de transtensión de la falla Liquiñe-Ofqui. La alta sismicidad que se presenta en el volcán Hudson podría utilizarse para realizar estudios de tomografía y conocer más sobre su comportamiento.

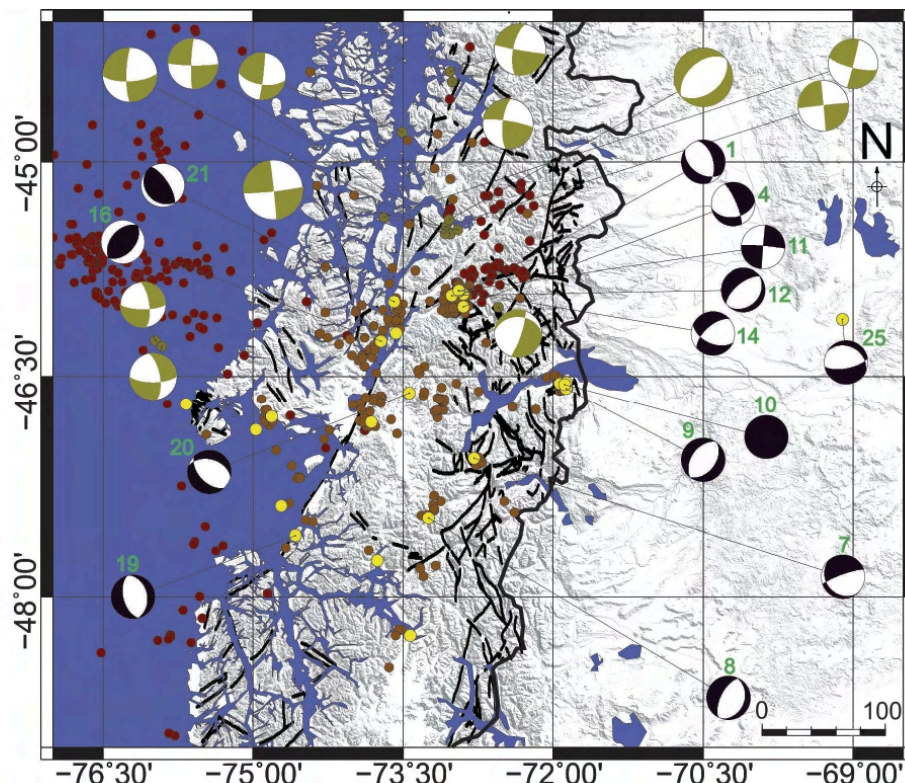


Figura 1: Localización de los mecanismos focales (proyectados en la semiesfera inferior). El color negro indica compresión para los mecanismos resueltos en este trabajo, al igual que los colores verdes tomados del catálogo CMT. Los puntos rojos representan sismos reportados por el catálogo CMT. Los círculos marrones, son los reportados por Agurto-Detzel et al. (2014). Los círculos amarillos representan la localización de los 25 sismos de este trabajo. La topografía está tomada de Shuttle Radar Topography Mission.

Mecanismos asociados al Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (eventos N° 16, 19, 20, 21, y mecanismos de color verde ocre):

En esta región se han descrito varios sismos de magnitudes mayores a 5 en la literatura. El movimiento de esta estructura se encuentra entre las fallas con mayor desplazamiento en el mundo. Se estima una tasa de movimiento dextral de $18,8 \pm 2$ mm/año, para los últimos 9000 años. Los sismos del catálogo CMT se ubican mayormente al sur de los $44,5^\circ$ S y la mayoría reporta fallamientos de rumbo con componente dextral y dirección N-S, exceptuando el sismo del 02/04/2007, de Mw 6,1 y 30 km de profundidad con rumbo NE-SO, que podría estar asociado a transtensión local en ese sector. En el límite sur de la LOFZ se obtuvieron dos mecanismos normales (eventos N° 19 y 21), uno con rumbo NNO-SSE y otro ONO-ESE, levemente al oriente de la falla, podrían responder a los ascensos anómalos de la corteza, generado por la presencia de la ventana astenosférica. Dentro de este grupo se incluyen mecanismos inversos ubicados sobre el trazo de la LOFZ (eventos N° 16 y 21), podrían responder a los procesos de compresión relacionados con la subducción de la placa de Nazca o podría responder a transpresión local en este sector, en particular responde a los esfuerzos compresivos reportados en el área por Suarez (2021). Distinguimos dos dominios, según si era al norte o al sur del PTC:

Dominio Norte PTC: Los mecanismos focales exhiben principalmente cinemática de strike-slip, con direcciones N-S, NE-SO y NNE-SSO con alguna componente normal, compatible con cizallamiento dextral de la LOFZ. Todos se localizan al norte del PTC, región que aún no ha sido afectada por el paso de la ventana astenosférica.

Se reporta solo un mecanismo normal puro sobre los fiordos chilenos, al oeste del Puerto Chacabuco. Seguramente relacionado con cambios en la línea de rumbo, dando lugar a estructuras en flor negativas, donde se localiza extensión local en fallamientos secundarios transtensivos.

Por otro lado, dos fallamientos inversos, ambos con una profundidad de 11 kilómetros, podrían responder a procesos compresivos relacionados a la subducción de la placa de Nazca.

Dominio Sur PTC: Se localizan dos mecanismos normales, región actualmente afectada por la apertura de la ventana astenosférica, caracterizada por un gap de sismicidad tectónica, responden al régimen tectónico que podría estar operando, en este caso el esfuerzo sería extensional según Suárez (2021).

Mecanismos asociados a fallas transformantes (Representados por esferas de color verde ocre al oeste del mapa):

Se encuentran al oeste sobre la placa Antártica en el Océano Pacífico, sus planos de activación posiblemente sean los que poseen una dirección de rumbo E-O, y se los atribuye al movimiento diferencial de las placas de Nazca con respecto a la Antártica.

Mecanismos asociados a procesos no tectónicos (eventos N° 7, 8, 9):

Podrían vincularse directamente a la actividad glaciaria, como el sismo que se encuentra sobre el Glaciar Pared Norte, o a procesos vinculados con procesos ambientales como deslizamientos o minería, ya que son sismos superficiales y de muy baja magnitud.

Mecanismos asociados a procesos antrópicos (eventos N° 10 y 25):

La sismicidad antrópica es generada por la actividad humana dentro de un medio natural y suele manifestarse con un incremento en la actividad sísmica histórica dentro de una zona en concreto y un periodo de tiempo determinado. Uno de los eventos es una explosión. Está ubicado al suroeste de Chile Chico, al sur de la región de Aysén dentro de Chile, y puede asociarse directamente con la actividad minera de la Mina Cerro Bayo.

Otro sismo de carácter antrópico es el sismo Las Heras, de Mw 4.9, ocurrido el 17 de octubre del 2019 al norte de la localidad Las Heras, en la cuenca de San Jorge dentro de un campo petrolero. Fue reportado en diferentes catálogos y cabe señalar que no se habían reportado sismos previos al inicio de las actividades de producción de hidrocarburos en ningún catálogo. El carácter de sismo disparado por fracturamiento hidráulico fue sugerido por Tamburini-Beliveau et al. (2022). Sin embargo, el mecanismo responde a esfuerzos tectónicos locales y fracturas previas, como las cartografiadas en SIGAM SEGEMAR, donde vemos que se ha mapeado una falla normal coincidente con el mecanismo focal.

Por último, cabe mencionar que el reporte de mecanismos focales en el sector es interesante teniendo en cuenta que en el área de estudio la sismicidad es reducida y hay pocos reportados en la literatura.

Palabras Clave: Sismos, Punto Triple de Chile, Falla Liquiñe-Ofqui, Sismos Antrópicos.

Agradecimientos: A IRIS que permitió acceder a los datos y descargarlos mediante Breq Fast y Wilber 3.0. También al aporte económico de los proyectos PICT 2019-00854, PROIPRO-UNSL 03-1520.

Referencias:

- Agurto-Detzel, H., Rietbrock, A., Bataille, K., Miller, M., Iwamori, H., Priestley, K., 2014. Journal of South American Earth Sciences, 51, 1-11.
- Ávila, P., Dávila, F. M., 2018. Tectonophysics, 747, 99-107. Breitsprecher, K., Thorkelson, D.J., 2009. Tectonophysics 464, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.02.013>.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S., 1994. Geophys. Res. Lett. 21, 2191-2194.
- Georgieva, V., Gallagher, K., Sobczyk, A., Sobel, E. R., Schildgen, T. F., Ehlers, T. A., Strecker, M. R., 2019. Earth and Planetary Science Letters, 511, 164-176.
- Gorring, M.L., Kay, S.M., Zeitler, P.K., Ramos, V.A., Rubiolo, D., Fernandez, M.I., Panza, J.L., 1997. Tectonics 16, 1-17. <https://doi.org/10.1029/96TC03368>.
- Gutiérrez, F., Gioncada, A., González Ferran, O., Lahsen, A., & Mazzuoli, R., 2005. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 145(3-4), 207-233.
- Lange, D., Cembrano, J., Rietbrock, A., Haberland, C., Dahm, T., Bataille, K., 2008. Tectonophysics 455, 14-24.
- Muñoz-Zapata, C., E., 2020. Cambios de los glaciares del volcán Hudson (45°54'S, 72°58'O) en respuesta a su erupción de octubre de 2011. Universidad de Chile. Tesis de grado.
- Scalabrino, B., Lagabriele, Y., Malavieille, J., Domínguez, S., Melnick, D., Espinoza, F., Suarez, M., Rossello, E., 2010. Tectonics, 29, 2.
- Stern, C., R., 2004. Active Andean Volcanism: its geologic and tectonic Setting. Revista Geológica de Chile, Vol. 31, No. 2, p. 161-206.
- Suárez, R. J., 2021. El efecto de la colisión de la dorsal de Chile y las anisotropías de basamento en la deformación de los Andes Patagónicos Australes: un enfoque desde el análisis cinemático y experimentos análogos. Universidad de Buenos Aires. Tesis doctoral.
- Tamburini-Beliveau, G., B., Grosso, J., A., Heredia, M. B., Pizarro, R., Pérez, J., P., Martín Cismondi, M. & Monserrat, O., 2022. Revista Nature 12:19198.

Estudio de resistividad eléctrica mediante el método magnetotelúrico en la zona de Cachapoal, Región del Ñuble: Evidencias de una posible falla geológica en el frente Andino

Andrés Stuardo Espinoza¹, Javiera Venegas¹, **Pablo Alarcón**¹, Joaquín Cortés², Mauricio Espinoza²

(1) Geo Resource Ltda., Chillán, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

El presente estudio se enmarca en el Proyecto Fondecyt Iniciación 11180509, financiado por el Estado de Chile y dirigido por el Dr. Joaquín Cortés Aranda. El objetivo general de este proyecto es identificar fallas geológicas activas en el límite entre la Cordillera Principal y la Depresión Central, específicamente en las regiones de Maule y Biobío.

En el contexto de este proyecto, se está llevando a cabo un estudio geofísico en la zona de Cachapoal, Región del Ñuble, utilizando el método magnetotelúrico. Esta metodología consiste en registrar las variaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales en la superficie de la Tierra, permitiendo obtener información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad.

El principal objetivo de esta investigación es analizar la resistividad eléctrica en la zona y determinar la posible existencia de una falla geológica ciega en el área de estudio. Además, se busca establecer correlaciones entre la información geológica y los parámetros geofísicos obtenidos en terreno mediante la medición magnetotelúrica. Estos parámetros incluyen la dimensionalidad geoelectrica del medio, el tensor de fase y las flechas de inducción.

El análisis detallado de estos parámetros geofísicos brinda una valiosa comprensión del comportamiento del medio. La dimensionalidad geoelectrica nos permite discernir la complejidad estructural del subsuelo y la posible presencia de heterogeneidades relevantes para la identificación de fallas. Asimismo, el tensor de fase proporciona información sobre la orientación preferencial de las estructuras geológicas, mientras que las flechas de inducción nos permiten obtener información sobre las variaciones laterales de resistividad.

El área de estudio se localiza sobre unidades sedimentarias que fueron depositadas durante el Plioceno – Pleistoceno, en un periodo de subsidencia (cuenca) en el valle central (Encinas *et al.*, 2020). Específicamente, afloran las formaciones Mininco, de edad Pliocena, y La Montaña, del Pleistoceno, definidas por Muñoz-Cristi (1960) y Gajardo (1981). La primera, distribuida en la porción occidental del área de estudio, corresponde a una secuencia sedimentaria de areniscas tobáceas, limolitas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas, depositados en ambientes lagunares y fluviales preglaciares (Muñoz Cristi, 1960) y por el lado oriental aflora Fm. La Montaña, que estaría cubriendo estratigráficamente a Fm. Mininco (Gajardo, 1981). Fm. La Montaña está principalmente constituida por depósitos morrénicos no consolidados y de baja compactación, que contienen sedimentos arcillosos caóticamente mezclados con fragmentos de rocas volcánicas, basálticas y graníticas. Además, se presentan intercalaciones bien estratificadas de arcillas, arenas y cenizas volcánicas, las cuales se interpretan como depósitos lagunares (Muñoz Cristi, 1960; Gajardo, 1981). Estudios recientes (Anavalón, 2018), postula una extensión mayor para Fm. La Montaña, la que correspondería estratigráficamente a lo definido como Fm. Malleco.

El método magnetotelúrico es una técnica de exploración que pertenece a los métodos electromagnéticos pasivos. Utiliza como fuente de energía un amplio espectro de variaciones magnéticas naturales, como las generadas por la interacción entre los vientos solares y la magnetosfera terrestre, así como las variaciones originadas por la actividad meteorológica, especialmente en zonas ecuatoriales y polares (Vozoff, 1991).

Esta técnica registra simultáneamente las variaciones temporales de los campos electromagnéticos en la superficie terrestre. A partir de la relación entre el campo magnético como señal de entrada y el campo eléctrico como señal de salida, se obtiene la función de transferencia magnetotelúrica conocida como Tensor de Impedancias. Este tensor relaciona las variaciones temporales de las componentes ortogonales de los campos eléctricos (E_x y E_y) y los campos magnéticos (B_x , B_y y B_z), permitiendo obtener información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la frecuencia. A partir de las relaciones entre las componentes magnéticas horizontales y verticales (B_x , B_y y B_z), se obtiene la función de transferencia geomagnética denominada Tipper, que proporciona información sobre las variaciones laterales de resistividad. Su representación gráfica se realiza mediante flechas de inducción.

Generalmente, la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo es tridimensional, lo que implica que varía en todas las direcciones. Sin embargo, en casos bidimensionales, existe una dirección particular en la que la resistividad eléctrica no varía, conocida como Strike Geo-eléctrico. Al examinar las componentes del tensor de impedancias, es posible identificar el ángulo del strike geoelectrico y rotar las componentes en función de él, lo que simplifica las componentes diagonales. Esta situación es especialmente relevante en presencia de fallas geológicas, donde se define una dirección específica.

Las mediciones geofísicas se realizaron utilizando el equipo magnetotelúrico ADU08e de la compañía Metronix. Hasta el momento se tiene la información de 9 estaciones de Magnetotelúrica, en un perfil con orientación Este-Oeste, estratégicamente orientado en dirección ortogonal a la falla inferida.

El procesamiento de los datos incluyó una inspección visual y un filtrado manual de segmentos ruidosos de las series de tiempo. Posteriormente, se aplicó la Transformada de Fourier para convertir los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. A continuación, se utilizó el código de procesamiento robusto de Egbert & Booker (1986) para eliminar el ruido presente y obtener la información del Tensor de Impedancias y Tipper en función de la frecuencia.

Los datos del Tensor de impedancias se presentaron en gráficos de resistividad aparente en función de la frecuencia. Para analizar la dimensionalidad del medio, se representaron gráficamente las elipses del Tensor de fase (Caldwell *et al.*, 2004) y las flechas de inducción del Tipper, siguiendo la convención de Parkinson (1959), donde apuntan hacia zonas de mayor conductividad. Para determinar la dirección del strike geoelectrico, se utilizaron las invariantes del Tensor de impedancias (Weaver *et al.*, 2000).

La inversión 2D de los datos se llevó a cabo utilizando el software Winglink, que implementa el código de Rodi & Mackie (2001). A los resultados obtenidos, se les aplicó un análisis de sensibilidad utilizando la metodología tipo Forward, en la que se analizó la profundidad de resolución de cada estación y la veracidad de las estructuras presentes en la inversión 2D.

El análisis del 'Strike geo-eléctrico' utilizando las invariantes de Weaver (Weaver *et al.*, 2000) revelan una dirección consistente en sentido Norte-Sur para frecuencias menores a 1.000 Hz. De los resultados del gráfico de las elipses del Tensor de fase para cada estación, se observa una clara tendencia hacia elipses casi circulares, acompañadas de valores del parámetro de dimensionalidad 'skew' menores a 3, principalmente entre los 1.000 y 10 Hz. Esto, dada las condiciones propuestas para el Tensor de Fase por Caldwell *et al.* (2004), es un claro indicador de una Bi-dimensionalidad del medio, y sugiere que el Tensor de impedancias está alineado con la dirección geoelectrica, teniendo estrecha relación con la dirección del lineamiento de falla propuesto (N-S).

Sin embargo, de los resultados obtenidos a través de las flechas de inducción, podemos apreciar una fuerte tendencia en dirección Noroeste, principalmente para frecuencias bajo los 100 Hz. Esto podría indicar la presencia de otra estructura conductiva con mayor influencia en la dirección Noroeste, o una sumatoria vectorial de anomalías conductivas presentes en la zona de estudio.

Para el modelo 2D seleccionado (Fig. 1), se utilizaron ambos modos de polarización (TE y TM) y el Tipper. Se logra ajustar de forma satisfactoria las curvas de resistividad aparente y fase de cada estación.

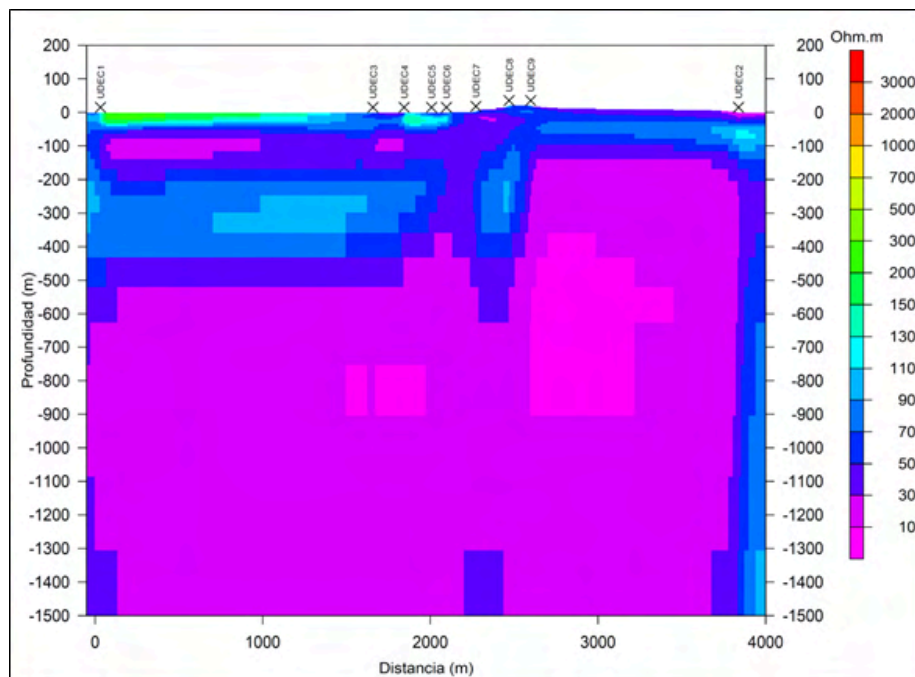


Figura 1: Inversión geo-eléctrica 2D.

Los resultados preliminares obtenidos a través de la inversión 2D revelan la presencia de 4 estructuras principales. La primera muestra un espesor máximo de 70 metros en la zona del valle y una resistividad promedio de 90 Ω m. La segunda estructura se extiende desde los 70 hasta los 170 metros, con un espesor que disminuye hacia el Este, y una resistividad promedio de 40 Ω m. La tercera estructura es más resistiva, con un valor promedio de aproximadamente 85 Ω m, y se extiende desde los 170 hasta los 431 metros en promedio. Esta estructura se vuelve más superficial hacia el Este y se interrumpe por una anomalía de baja resistividad bajo las estaciones UDEC6 y UDEC7. La última capa del modelo muestra nuevamente características conductivas, con una resistividad promedio de alrededor de 15 Ω m, y se extiende desde los 431 metros hasta los 1.500 metros en promedio.

El análisis de sensibilidad realizado revela un límite de profundidad de resolución promedio de 3.000 metros para las estaciones con los periodos de medición más largos (UDEC3, UDEC8 y UDEC9), y de 900 metros para el resto de las estaciones. Debido a la distancia entre las estaciones de los extremos (UDEC1 y UDEC2) y el perfil principal, se produce una pérdida de resolución, siendo interpretable sólo la información bajo las estaciones.

Se reconoce una posible estructura asociada a una falla Norte-Sur en la zona de Cachapoal. Esto debido a la variación de los valores de resistividad en profundidad, correlacionado a la presencia de un strike geoelectrico en la misma dirección. La implicancia de esta estructura podría corresponder a un salto de falla de 300 m en el margen entre el valle central y precordillera, lo que representaría la estructura más occidental en el levantamiento de la cordillera andina en las latitudes de estudio.

Las unidades geológicas involucradas podrían ser la Formación Mininco y Formación Montaña. Sin embargo, según los datos geofísicos y geológicos del área, es posible que la Formación Mininco esté ausente en superficie y sólo aflore Formación Montaña, que se ve fuertemente influenciada por la falla antes mencionada. Lo que implicaría la erosión de esta, en la parte oriental, debido al alzamiento de la morfoestructura de la precordillera.

Las estructuras de resistividad indican la presencia de una unidad geológica profunda, homogénea y de baja resistividad, ubicada entre los 400 y 1.500 metros de profundidad. Debido al carácter conductor de esta estructura, es posible que sea la causa de la anomalía observada en las flechas de inducción del Tipper, superponiéndose a la anomalía generada por la posible falla. De todas formas, el valor bajo de resistividad de esta zona abre la posibilidad que esta unidad no corresponda a un basamento rocoso, y de ser una unidad de rocas volcánicas, se trataría de una unidad fuertemente alterada y/o meteorizada. Incluso existe la posibilidad de que esta unidad de baja resistividad corresponda a Fm. Mininco, de composición areniscas ricas en pómez, tobas y en menor medida limos (Anavalón, 2018), unidad que probablemente se encuentre alterada a arcillas.

En la zona del valle, debido a los valores de resistividad y a la disposición de estos, se aprecia la posibilidad de un acuífero profundo, en sedimentos de la Fm Montaña, bajo los 170 m y hasta los 400 m. Lo anterior desde el punto de vista hidrogeológico, significaría la posibilidad de reservas de recursos hídricos subterráneos, no explotables en la actualidad, lo que se recomendaría acompañar de más mediciones y una perforación exploratoria, para delimitar esta unidad.

Por último, la correlación entre la información geológica y los parámetros geofísicos obtenidos ha sido satisfactoria, demostrando la eficacia del método magnetotélurico en la identificación de estructuras geológicas y la caracterización de la resistividad eléctrica en el subsuelo. Estos resultados preliminares son un punto de partida prometedor para desarrollar futuras investigaciones, y mejorar el conocimiento geológico en la zona de Cachapoal.

Palabras Clave: Magnetotélurico, Alzamiento Andino, Fallas.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt Iniciación 11180509, Joaquín Cortes.

Agradecimientos: Proyecto Fondecyt Iniciación 11180509-Joaquín Cortes. Queremos agradecer a la comunidad de Cachapoal, en especial a Claudio Dospital y Domingo Romero, por facilitarnos los terrenos para las mediciones.

Referencias:

- Anavalón, A. 2018. Evolución tectonosedimentaria de los depósitos Plio-Pleistocenos del Valle Central de Chile, entre los 36° 50' S y 38° 50' S. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Concepción. Departamento Ciencias de la Tierra. 133 pp. Concepción.
- Caldwell, T. G.; Bibby, H. M.; & Brown, C. 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), 457-469.DGA. 2011. Estudio hidrogeológico Cuencas Bío Bío e Itata. Cuenca Itata. Tomo III: Planos. Geología Cuenca Itata escala 1:250.000. Dirección General de Aguas. S.I.T. N° 258. Santiago.
- Egbert, G. & Booker, J. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal International*, Vol. 87, Issue 1, 173-194 pp.
- Encinas, A.; Sagripanti, L.; Rodríguez, M.P.; Orts, D.; Anavalón, A.; Giroux, P.; Otero, J.; Echaurren, A.; Zambrano, P.; Valencia, A. V. 2020. Tectonosedimentary evolution of the Coastal Cordillera and Central Depression of south-Central Chile (36° 30' - 42° S). *Earth-Science Reviews*.
- Gajardo, A. 1981. Hoja de Concepción-Chillán, Región del Bío-Bío. Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares 4: 32 p., escala 1:250.000.
- Muñoz Cristi, J. 1960. Contribución al conocimiento geológico de la Cordillera de la Costa de la Zona Central. *Minerales*. Vol. 15 (69): 28-46. Santiago.
- Parkinson, W. 1959. Directions of rapid geomagnetic fluctuations. *Geophysical Journal International*, 2(1): 1-14.
- Rodi, W. & Mackie, R. L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1), 174-187.
- Voss, K. 1991. The magnetotelluric method. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B*. Society of Exploration Geophysicists: 641-712 pp.
- Weaver, J. T.; Agarwahl, A. K.; Lilley, F. E. M. 2000. Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophysical Journal International*, 141(2), 321-336.

Revelando la historia geológica del Frente Occidental Andino a partir de la Zona de Falla Pocuro (32.8°S)

Matías Taucare¹⁻²⁻³, Tomás Roquer²⁻⁴, Gert Heuser⁴, Nicolás Pérez-Estay², Gloria Arancibia²⁻⁴, Gonzalo Yáñez⁴, Benoît Viguier⁵⁻⁶, Ronny Figueroa⁷, Diego Morata¹⁻², Linda Daniele¹⁻²⁻³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago, Chile

(5) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France

(6) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(7) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Grupo de Geociencias, La Serena, Chile

Este estudio tiene por objetivo explicar la reactivación selectiva de fallas normales durante la orogenia Andina en el flanco occidental de la zona sur de los Andes Centrales. Para ello hemos llevado a cabo un mapeo estructural multiescalar (de escala regional a microscópica) y una reconstrucción del campo de estrés a los 32.8°S en la Zona de Falla de Pocuro. Los resultados revelan que la arquitectura de la Zona de Falla Pocuro es consecuencia de al menos dos fases de deformación sobrepuestas, evidenciando cada una de ellas una evolución gradual y progresiva. La fase de deformación más temprana está registrada por dos fallas normales de rumbo ~NS bordeadas por una zona de daño de 5 km de anchura. Esta zona de daño se caracteriza por presentar vetas de cuarzo-laumontita y calcita las cuales se desarrollaron bajo un régimen extensional con un eje σ_3 de rumbo WNW-ESE. La última fase de deformación está registrada por una falla inversa-dextral de rumbo NS con precipitación sintectónica de goethita-hematita y dos fallas inversas-sinestrales de rumbo NW. Las fallas inversas se desarrollaron bajo un régimen compresional/transpresional caracterizado por un eje σ_1 de dirección ENE-WSW y una alternancia entre los ejes σ_2 y σ_3 . A partir de una reevaluación de datos geofísicos tomados en estudios anteriores (Bustamante et al., 2012; Figueroa et al., 2021), dedujimos que las fallas observadas en superficie dentro de la Zona de Falla Pocuro son estructuras profundas de escala regional. Teniendo en cuenta los datos geocronológicos existentes (Fariás et al., 2008; Rodríguez et al., 2018; Stalder et al., 2020), correlacionamos las fases más temprana y tardía con la extensión de la cuenca de Abanico durante el Eoceno medio-Mioceno temprano y su posterior inversión en el Mioceno. Dadas las evidencias neotectónicas (marcadores geomorfológicos y deformación de depósitos no consolidados), es probable que esta última fase aún continúe activa. La cementación del material cataclástico de los núcleos de la falla con cuarzo-laumontita promueve un fortalecimiento mecánico que propicia una retroalimentación negativa para la reactivación de las fallas normales heredadas como inversas. Por el contrario, la concentración de fracturas en la zona de daño entre las fallas normales promueve el debilitamiento mecánico dando lugar a una zona preferencial para la propagación de fallas inversas durante la fase compresiva/transpresiva.

Los detalles de este estudio pueden encontrarse en: Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez-Estay, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguier, B., Figueroa, R., Morata, D., Daniele, L., 2022. Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pocuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8°S). *Journal of South American Earth Sciences* 118, 103914. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2022.103914>.

Palabras Clave: Geología Estructural, Paleoestrés, Deformación Polifásica, Inversión Tectónica, Fortalecimiento Mecánico

Financiamiento: El apoyo financiero fue proporcionado principalmente por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) a través de los programas de financiamiento público FONDECYT no. 1170569, FONDAPE no. ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA), Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007, y el programa de cooperación Chile Francia ECOS-CONICYT no. 180055/C18U03. El consorcio CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349 también proporcionó apoyo financiero a este estudio. Las becas de doctorado de los doctores Taucare, Roquer y Heuser, fueron financiadas por el programa Beca de Doctorado Nacional de ANID no. 21160325, 21171178 and 21171021, respectivamente, mientras se desarrollaba el estudio.

Agradecimientos: Lo/as autores agradecen sinceramente a quienes facilitaron los accesos para el trabajo de campo y las observaciones constructivas de la Dra. Laura Giambiagi, el Dr. Lucas Fennell y el Dr. Allan López.

Referencias:

- Bustamante, M., Lemus, M., Cortés, R., Vivallos, J., Cáceres, D., Wall, R., 2012. Exploración geológica para el fomento de la energía geotérmica: Área de Jahuel, Región de Valparaíso (Informe inédito).
- Fariás, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., Comte, D., 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33° - 35°S). *Tectonics* 27. <https://doi.org/10.1029/2006TC002046>.
- Figueroa, R., Viguier, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment* 771, 145456. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>.
- Rodríguez, M.P., Charrier, R., Brichau, S., Carretier, S., Fariás, M., de Parseval, P., Ketcham, R.A., 2018. Latitudinal and Longitudinal Patterns of Exhumation in the Andes of North-Central Chile. *Tectonics* 37, 2863–2886. <https://doi.org/10.1029/2018TC004997>.
- Stalder, N.F., Herman, F., Fellin, M.G., Coutand, I., Aguilar, G., Reinert, P.W., Fox, M., 2020. The relationships between tectonics, climate and exhumation in the Central Andes (18–36°S): Evidence from low-temperature thermochronology. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103276>.

Arquitectura y evolución estructural de la cordillera del Maule, sector sur de Chile central: transectas de los valles de Teno y Maule (34° 30' - 36° 30'S)

Amanda Valdés¹, José Piquer¹, Nicolás Oyarzún¹, Bárbara Montero¹, Viktoria Georgieva¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Ciencias, Av. Eduardo Morales Miranda, Edificio Emilio Pugín, Valdivia, Chile

La Cordillera Principal de Chile es un lugar propicio para observar y estudiar los distintos tipos de estructuras geológicas que acomodan la deformación en un margen continental activo, entre las que se cuentan fallas de bajo y alto ángulo. La importancia en particular de las fallas de alto ángulo recae en que pueden relacionarse con la geometría y distribución de distintos depósitos minerales, fuentes geotermales y centros volcánicos antiguos y activos. Gran parte de estas estructuras se caracterizan por presentar un largo historial de reactivaciones con distinta cinemática, asociada a procesos de extensión y compresión tectónica durante diferentes periodos de tiempo. En este trabajo, se estudiaron dos transectas de orientación aproximada E-W, correspondientes a los valles de los ríos Teno y Maule.

El objetivo de este estudio es analizar los sistemas de falla mayores presentes en las transectas, tanto oblicuos como paralelos al arco magmático, y su relación con actividad magmático-hidrotermal. Los resultados permiten estimar, además, las tasas de acortamiento mínimo observadas en estas transectas con ayuda del software Andino3D.

En las transectas se reconocieron distintas formaciones cenozoicas, meso – cenozoicas y mesozoicas. Además, se colectaron datos estructurales, los cuales fueron correlacionados posteriormente para interpretar fallas de mayor magnitud, presentando continuidad y alineamientos geométricos con otros elementos geológicos significativos.

Adicionalmente, se tomaron muestras de distintos cuerpos ígneos, con el objetivo de comprender en detalle su historia y su relación con las estructuras mayores estudiadas en las transectas. Estas muestras fueron trabajadas en laboratorio, donde se realizaron análisis químicos (ICP-AES; ICP-MS), cortes transparentes y datación U-Pb en circones.

Respecto a las estructuras encontradas, los criterios de clasificación y agrupamiento recaen en la tendencia general del rumbo y componente de desplazamiento, alineamiento con centros volcánicos, fuentes hidrotermales, orientación preferencial de diques y vetillas, entre otros.

Como resultado, se reconocieron distintas fallas de gran magnitud. En el valle del Teno se reconocieron un total de 7 sistemas de falla mayores. Dentro de estos sistemas, se destaca la falla Cayetano, la cual se interpreta como una estructura permeable, capaz de permitir el emplazamiento de cuerpos ígneos, y además, al intersectarse con el sistema de falla Portezuelo podría generarse un mayor grado de permeabilidad en el área. Por otro lado, también se destacan los sistemas de fallas Chacarillas y Portezuelo, los cuales se interpretan como estructuras estrechamente relacionadas con el sistema tipo pórfido descrito en el valle como “Pórfido Teno”.

En el valle del Maule se reconocieron un total de 8 sistemas de falla mayores. En este valle se destacan los sistemas de fallas Campanario y Calabozos, los cuales presentan una intersección con la falla Maule o Los Cóndores. Esta intersección permitiría el aumento de permeabilidad en el área, interpretándose como una estructura que favorece el transporte de fluidos hidrotermales y emplazamiento de cuerpos magmáticos. También se destaca el sistema Armerillo, el cual presenta un alineamiento con distintos cuerpos mineralizados y, además, se encontraría interceptando a la falla el Melado. Por último, se destacan los sistemas de fallas Monjes Blancos, Bobadilla y El Salto, cuyos criterios permiten interpretar estos lineamientos como posibles conductos de transporte de fluidos hidrotermales y emplazamiento de cuerpos magmáticos.

Luego de realizar las interpretaciones y estudios descritos en las transectas, se estimaron las tasas de acortamiento mínimas, resultando un 13% de acortamiento para el valle del Teno y un 20% para el valle del Maule. Las diferencias en la tasa de acortamiento se relacionan principalmente a las diferentes intensidades de compresión tectónica, evidenciada en rasgos estructurales, principalmente pliegues por propagación de falla, a las características reológicas de la roca, y por último, a los eventos tectónicos compresivos ocurridos previo a la depositación de las unidades cenozoicas, afectando a rocas mesozoicas presentes mayormente en la transecta del Maule.

Palabras Clave: Fallas de alto ángulo, Tasas de acortamiento, Compresión tectónica, Sistemas de fallas, Chile central.

Controles de la estratigrafía en las redes de fracturas en rocas ígneas Jurásicas falladas: un análisis estructural en los Andes del Norte Colombianos

Juan Camilo Valencia-Gómez¹, Agustín Cardona¹, Sebastián Zapata², Maryi Rodríguez-Cuevas¹, Laura Calderón¹, Gaspar Monsalve¹

(1) Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia

(2) Universidad del Rosario, Facultad de Ciencias Naturales, Bogotá, Colombia

El entendimiento de los atributos de fracturas tiene múltiples aplicaciones en la exploración de recursos, debido a que influyen la configuración estructural y las propiedades físicas de las rocas reservorio. Si bien, numerosos trabajos en estratigrafía de fracturas han sido desarrollados en secuencias clásticas y carbonatadas, pocos casos han investigado la influencia de la reología de rocas ígneas en los sistemas de fracturas.

La cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM), localizada en el sur de los Andes Colombianos, es el resultado de la sedimentación y deformación Mezo-Cenozoica, donde diferentes fallas regionales con tendencia NNE-SSW exponen el basamento cristalino como resultado de la evolución estructural polifásica de la cuenca. En el VSM se exponen unidades plutónicas y volcánicas Jurásicas que reposan sobre secuencias carbonatadas Triásicas. Rocas del basamento Jurásico están en contacto con las rocas sedimentarias Cretácico-Cenozoicas que conforman el sistema petrolífero comercial de la cuenca, a través del sistema de fallas inversas Agrado-Betania.

En esta contribución integramos estratigrafía, petrografía, termocronología de baja temperatura, petrofísica, y análisis de sistemas fracturados con el fin de evaluar la evolución estructural e investigar la relación entre litología y las propiedades de fracturas en rocas ígneas dentro de la zona de daño de este sistema de fallas. Además, integramos un análisis de facies volcánicas con geocronología para entender la temporalidad, los procesos, y ambientes de generación de las rocas de basamento y sus implicaciones en la configuración tectónica del Jurásico en los Andes del Norte.

A partir de 4 secciones estratigráficas identificamos 19 litofacies, las cuales fueron agrupadas en 4 asociaciones de facies diferentes. La mayor parte de la Formación Saldaña en estas secciones está conformada por depósitos masivos de corrientes de densidad piroclástica (CDP's), interestratificadas con muy pocos depósitos laminados de llanura de inundación (FF), y depósitos masivos de flujos gravitacionales (SGF). La geocronología sugiere que esta unidad fue depositada en un entorno volcánico activo durante el Triásico Tardío.

El análisis estructural permitió identificar una zona de daño de ~743 m de amplitud, donde la intensidad de las fracturas incrementa con la proximidad al plano de la falla principal. Además, identificamos diferencias en el fracturamiento asociadas con los contrastes reológicos; por ejemplo, las tobas de ceniza exhiben una alta intensidad de fractura por área ($>30\text{m/m}^2$), mientras que los conglomerados tobáceos y las cuarzomonzodioritas presentan valores bajos ($<20\text{m/m}^2$). Adicionalmente, aunque las redes de fracturas presentan valores elevados de conectividad, no existe una relación con la litología o la posición estructural. El cálculo de las variables petrofísicas matriz-fracturas arrojó altos valores de permeabilidad ($>1.000\text{mD}$) y bajos valores de porosidad (0,2%-5,1%), coincidiendo con resultados típicos en reservorios de hidrocarburos en rocas volcánicas fracturadas alrededor del mundo.

Los resultados indican que la litología y la posición estructural controlan la intensidad de las fracturas, debido a diferencias en el tamaño de grano, el contenido de arcillas, y la magnitud de la deformación. Sin embargo, la naturaleza de las fracturas y su arreglo geométrico es el factor de primer orden en el desarrollo de una alta conectividad. Adicionalmente, la geocronología y el análisis de facies sugieren que las rocas volcánicas de la Formación Saldaña registran el inicio temprano del magmatismo durante Triásico-Jurásico, donde la actividad volcánica fue altamente explosiva y de composición ácida, generando grandes depósitos de ignimbritas intercalados con pocas secuencias sedimentarias clásticas. Finalmente, la integración del análisis estructural y la termocronología de baja temperatura sugiere la existencia de varios eventos deformacionales entre el Cretácico y el Mioceno, durante los cuales se desarrollaron estos sistemas de fracturas.

Estos resultados sugieren que en términos de capacidad de almacenamiento pueden ocurrir reservorios en basamento fracturado en el subsuelo de la cuenca del VSM.

Palabras Clave: Estratigrafía de fracturas, Estratigrafía volcánica, Arquitectura de fallas, Magmatismo Jurásico, Andes del Norte.

Financiamiento: Esta investigación está enmarcada en el proyecto aprobado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, e Innovación y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) de Colombia, titulado "STRUCTURAL MODELLING AND PETROPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE FRACTURED CRYSTALLINE BASEMENT RESERVOIR ANALOGS IN THE UPPER MAGDALENA VALLEY, COLOMBIA, A NEW EXPLORATION OPPORTUNITY?". El proyecto fue realizado a través del Grupo de Estudios en Geología y Geofísica (EGEO) con código (COL0150558), el cual está vinculado a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Agradecimientos: Los autores agradecemos a MinCiencias, ANH, y a los integrantes del grupo de investigación EGEO que hicieron parte de todas las campañas de campos y las discusiones.

Análisis estructural de la Cordillera Principal entre la Quebrada del toro y el Cajón del Melado (región del Maule, Chile): implicancias en la arquitectura del orógeno andino

Eduardo Vargas-Zapata¹, Mauricio Espinoza Vargas¹, Andrés Tassara¹, Juan-Pablo Contreras Figueroa²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

Dentro de los modelos que se han propuesto para representar los mecanismos mediante los cuales se alza la cordillera, aquellos que lideran el debate son, por una parte, el que postula que el alzamiento está controlado por un despegue cortical que verge hacia el este, con estructuras de vergencia opuesta actuando como retrocorrimientos que acomodan la deformación, y por otra parte el modelo que postula que el alzamiento es controlado por un despegue de vergencia oeste (West Thrust System o WTS). Ambos modelos difieren tanto en la vergencia de la estructura principal como en las edades asociadas a la deformación, postulando diferentes sectores en los cuales se localizaría el despegue activo.

En el frente cordillerano entre los $\sim 35^{\circ}45' - 36^{\circ}S$, en una posición equivalente al WTS, recientemente se han propuesto dos estructuras mayores de vergencia W de rumbo NE, Falla Mesamávida (FM, Sepúlveda, 2019; Vega, 2021) y Falla Ancoa (FA, Espinoza *et al.*, 2022). La FM actuaría como una estructura activa en el frente cordillerano, y la FA como una estructura antigua, formada durante la apertura de la Cuenca de Abanico e invertida posteriormente. Hacia el oriente comienza el dominio del sector occidental de la Faja Corrida y Plegada de Malargüe, con una vergencia predominantemente al este. Cómo interactúan en profundidad las estructuras de vergencia opuesta a esta latitud aún es desconocido.

En este trabajo se integran observaciones de campo y resultados geocronológicos preliminares aportados por Contreras *et al.* (in prep), con el fin de realizar un modelamiento cinemático de tipo *forward* de uno de los primeros sistemas de fallas de vergencia oriental propuesta con el nombre de Falla Las Zorras (FLZ), así como también sistemas de pliegues y fallas ciegas subordinados.

La FLZ actuaría como una estructura inversa que monta rocas eoceno-oligocenas asociadas preliminarmente a la Fm. Colbún (correlacionable con la Fm. Abanico), sobre rocas miocenas asociadas preliminarmente a la Fm. Cura-Mallín. Proponemos que esta estructura probablemente facilitaría el emplazamiento y posterior exhumación de rocas plutónicas del Mioceno (Batolito El Melado). A través del modelamiento *forward* mediante *Trishear* fue posible inferir un desplazamiento de ~ 6.300 m para la falla, así como espesores mínimos para las rocas eoceno-oligocenas (3500 m) y miocenas (800 m).

En base a las relaciones de contacto identificadas, antecedentes geocronológicos, y el modelamiento *forward*, se identificaron dos eventos compresivos en la zona de estudio. El primero, pliega intensamente las rocas cenozoicas y ocurriría posterior a los ~ 18 Ma, probablemente asociado a la inversión de la Cuenca de Abanico. El segundo evento ocurre durante el Mioceno tardío, posterior a los ~ 10 Ma, plegando las rocas del Mioceno tardío en la región. La temporalidad de la deformación es congruente con un inicio tardío del régimen compresivo en esta latitud, posterior a los 18 Ma, a diferencia de lo observado en latitudes cercanas a los $33^{\circ}S$ donde este régimen comenzaría alrededor de ~ 25 Ma.

Palabras Clave: Andes Centrales, Modelamiento cinemático *forward*, Secciones balanceadas, Geología estructural, Fallamiento cortical.

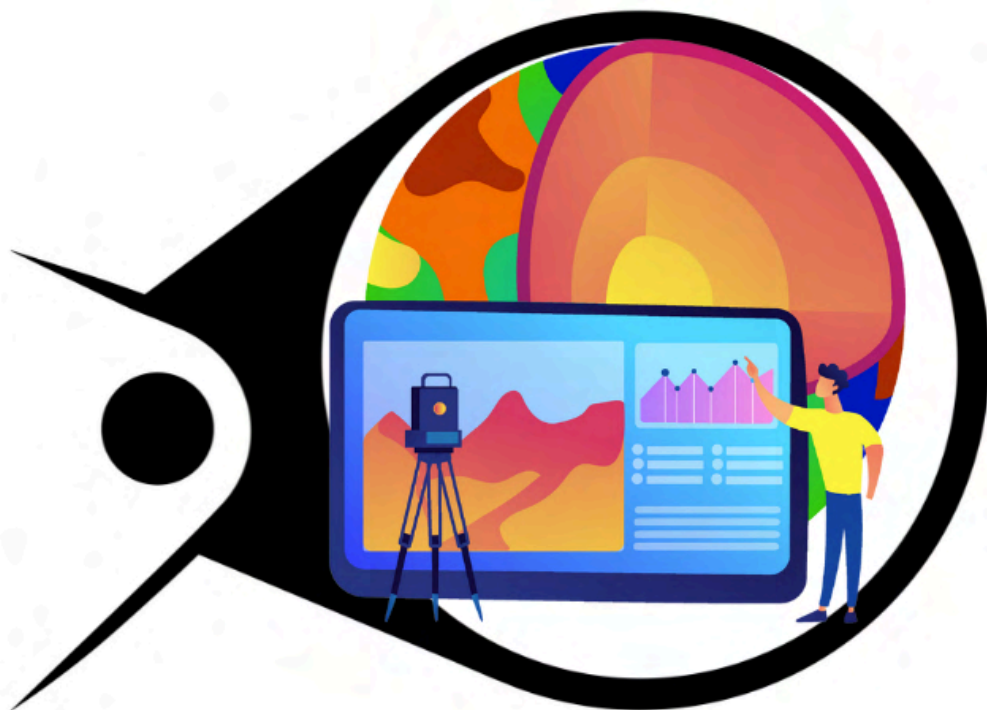
Financiamiento: Esta tesis fue llevada a cabo gracias al financiamiento y dirección del proyecto Fondecyt titulado "Long-term structural evolution of the western Andean slope and its control on the west-vergent seismogenic front (Chile, $\sim 36^{\circ}S$)", dirigido por el Dr. Mauricio Espinoza Vargas.

Agradecimientos: A Mauricio Espinoza Vargas, por permitirme entrar a su grupo de trabajo y por prestar el apoyo financiero y académico para el desarrollo de este estudio.

Referencias:

- Astaburuaga, D. (2014). Evolución estructural del límite mesozoico-cenozoico de la Cordillera principal entre $35^{\circ} - 30'Y - 36^{\circ}S$, Región del Maule, Chile (Tesis de Magíster, Universidad de Chile).
- Espinoza, M., Cortés-Aranda, J., Contreras, J. P., Maksymowicz, A., Vargas-Zapata, E., Fosdick, J., Mueller, M., Tassara, A. (2022). Anatomy and Structural Evolution of the Western Andean Slope in Central Chile ($36^{\circ}S$). American Geophysical Union, Chicago, USA.
- Sepúlveda Rivera, T. P. (2019). Neotectónica y paleosismología de la falla Mesamávida: evidencia de actividad cuaternaria tardía del cabalgamiento andino occidental (WATF) en la Región del Maule, Chile Central ($36^{\circ}S$) (Tesis de pregrado, Universidad de Concepción).
- Vega Ruiz, A. J. (2021). Paleosismología de la falla mesamávida, frente andino occidental en Chile Central ($36^{\circ}S$): antecedentes a partir del mapeo de la trinchera Los Barros y la datación morfológica de su escarpe mediante el código scarplet (Tesis de pregrado, Universidad de Concepción).

ÁREA TEMÁTICA 2: INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN GEOCIENCIAS



Testing the link between aseismic ridge subduction and Andean porphyry-type deposit formation during the Neogene: A Machine Learning approach

Mauro Castillo¹, Osvaldo Rabbia², Andrés Tassara³

(1) Universidad de Concepción, Programa de Doctorado en Ciencias Geológicas, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Instituto GEA, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

In the last decade, there has been an increase in demand for minerals and metals due to the global trend toward decarbonization. Porphyry-type deposits (PCD) are crucial because they provide most of the world's copper and significant amounts of gold and molybdenum (Sillitoe, 2012). Despite the increased economic investment in mineral exploration, the rate at which these mineral deposits are discovered has steadily decreased over time (Lusty & Gunn, 2015). This problem highlights that geologists must incorporate new methodologies and technologies to assist in mineral exploration (Holliday & Cooke, 2007).

This contribution employed machine learning (ML) modeling using the supervised learning algorithm XGBoost (a decision tree-based algorithm) as a novel method to identify and quantify the optimal combination of parameters for Andean PCD formation during the Neogene between 0-38°S. Since the formation of these deposits on a regional scale is associated with prolonged compressive periods (Richards, 2005), the parameters considered here incorporate those mechanisms frequently mentioned in the literature to trigger this type of tectonic regime in the overriding plate. This includes spatial and temporal variations in plate kinematic parameters such as convergence rate between Nazca-South America, obliquity of subduction, and subducting ocean floor age at the trench (Horton, 2018). On the other hand, the influence of less traditional mechanisms on metallogenesis, such as aseismic ridge subduction, was also considered. This idea is mainly supported by the apparent spatiotemporal correlation between increased metallogenic activity and aseismic ridge subduction along the Northern and Central Andes during the Neogene period (Cooke et al., 2005; Rosenbaum et al., 2005). The effects of aseismic ridge subduction were tested by including parameters that can affect the tectonic regime of the overriding plate, such as the ridge's axis obliquity with respect to the trench and convergence velocity direction. Variations in these parameters result in changes in the spatial distribution of stresses in the overriding plate, as depicted by several analog and numerical models (Martinod et al., 2013; Zeumann & Hampel, 2016). The aseismic ridge-related parameters were obtained based on the collisional trajectories of the Juan Fernández, Copiapó, Taltal, Iquique, and Nazca ridges. The collisional trajectories were modeled following the procedures outlined in earlier publications (Bello-González et al., 2018; Quiero et al., 2023 in prep.). The main difference between these works is that they utilized different kinematic models, which led to the generation of two separate sets of collisional trajectories. Both studies were considered to isolate potential model-dependent outcomes.

The collected data was organized into two matrices (one for each set of collisional trajectories) built from an updated PCD dataset for the space-time window examined in this study. Each deposit has a specific spatiotemporal position, Cu tonnage, and associated values for all the kinematic and aseismic-ridge-related parameters mentioned. The parameters were assigned based on the respective deposits' ages and latitudes. To capture the long-term effects of these parameters over time, the analysis took into account the average values within the previous 5 Myr to each deposit's spatiotemporal position. In particular, the aseismic ridge-related parameters were handled by identifying first the nearest aseismic ridge to each deposit position at a given time.

The ML analysis focused on classifying the PCD based on Cu tonnage (output variable), while the rest of the parameters served as input variables for the models. The performance of the ML models was evaluated using a five-fold cross-validation approach, which demonstrated consistent and accurate results.

Preliminary results support the idea that subducting ridges generate additional compression in the overriding plate, potentially enhancing the metallogenic arc fertility. The feature importance analysis of the models revealed that changes in the ridge's axis obliquity with respect to the convergence velocity direction and subducting ocean floor age at the trench strongly influence the metallogenic potential of an arc segment (e.g., lower obliquities and younger subducting ocean floor ages are associated with higher Cu tonnage).

Finally, the ML models' predictions were used to map the probability of finding PCD along the Andes during the Neogene, according to the given classification thresholds. These results are significant because they imply that aseismic ridges' collision effects can be incorporated into the current exploration algorithms, thereby enabling the exploration targets to be more tightly constrained.

Keywords: porphyry-type deposits, machine learning, aseismic ridge subduction, Nazca plate kinematics, Andes.

References:

- Bello-González, J. P., Contreras-Reyes, E., & Arriagada, C. (2018). Predicted path for hotspot tracks off South America since Paleocene times: Tectonic implications of ridge-trench collision along the Andean margin. *Gondwana Research*, 64, 216-234.
- Cooke D. R., Hollings, P., & Walshe, J. L. (2005). Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic geology*, 100(5), 801-818.
- Holliday, J. R., & Cooke, D. R. (2007). Advances in geological models and exploration methods for copper±gold porphyry deposits. In *Proceedings of exploration* (Vol. 7, pp. 791-809).
- Horton, B. K. (2018). Tectonic regimes of the central and southern Andes: Responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37(2), 402-429.
- Lusty, P. A. J., & Gunn, A. G. (2015). Challenges to global mineral resource security and options for future supply. London: The Geological Society of London.
- Martinod, J., Guillaume, B., ... & Regard, V. (2013). Effect of aseismic ridge subduction on slab geometry and overriding plate deformation: Insights from analogue modeling. *Tectonophysics*, 588, 39-55.
- Richards, J. P., & Porter, T. M. (2005). Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits. *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*, 1, 7-25.
- Rosenbaum, G., Giles, D., ... & Duboz, C. (2005). Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 239(1-2), 18-32.
- Sillitoe, H. R. (2012). Copper provinces.
- Zeumann, S., & Hampel, A. (2016). 3D finite-element models on the deformation of forearcs caused by aseismic ridge subduction: The role of ridge shape, friction coefficient of the plate interface and mechanical properties of the forearc. *Tectonophysics*, 684, 76-91.

The potential of decision trees applied to the chlorite vector in targeting porphyry deposit systems: insights from El Teniente

Alonso Hidalgo-Gajardo¹, Laura Hernández², Osvaldo Rabbia², Thomas Ulrich³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Instituto GEA, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(3) Aarhus University, Department of Geoscience, Høegh-Guldbergs Gade 2 building 1672, 121 8000 Aarhus C, Aarhus, Denmark

Introduction

The chemical composition of hydrothermal chlorite has been recognized as a potential vectoring tool towards porphyry copper deposits centers (Cooke *et al.*, 2020), making it the most critical mineral group in the widespread propylitic halo to be used in the exploration. Element enrichment trends in proximal (e.g., Ti, Sc, V, Al) and distal (e.g., Sr, Ca, Li, Co) parts, as well as peak halos reached at a certain distance from the deposit center (e.g., Mn, Zn) are recognized. Despite these observations, to effectively promote the use of this mineral as a vectoring tool two challenges must be overcome. First, our understanding of the multifactorial nature that controls the chemical composition of chlorite needs to be improved, and second, implementing a quantitative model capable of predicting the distance from a porphyry deposit center. The former is continuously improved as evidenced by recent works focused on chlorite mineral chemistry, while the latter has been only addressed by traditional univariate regression methods (e.g., Wilkinson *et al.*, 2015, 2020).

Wilkinson *et al.* (2020) and Schulz (2020) evaluated the potential use of hydrothermal chlorite as a vectoring tool in the El Teniente Cu-Mo porphyry system. In the case of Wilkinson *et al.* (2020), chlorite was analyzed from 135 rock samples (outcrops and drill holes) located at variable elevations and horizontal distances between 1 km and 6.6 km from the deposit center. These authors came up with a robust regression of the distance from the deposit center as a function of $\ln(\text{Ti}/\text{Sr})$, yielding an average error of ± 640 m (1 σ). In addition to mineral chemistry, Schulz (2020) also investigated chlorite with optical microscope from 28 rock samples taken at the Adit71 –an $\approx$ E-W horizontal tunnel at 2042 m a.s.l., previously used as mine access– and defined three main interference colors (green-gray, brown-orange, and blue-violet) whose distribution is related to the hydrothermal domains and therefore, to the distance from the deposit center. Samples from the Adit71 are located between 0 and 2.25 km from the Braden pipe and record the hydrothermal zonation of the porphyry system from a proximal potassic domain that evolves towards a transition zone to the extensive propylitic halo, locally overprinted by late phyllic events (Carvajal, 2014; Heredia, 2018). They also record the sulfide zonation characterized by an ore halo ($> 1\%$ chalcopyrite and $< 3\%$ pyrite) in the potassic transition domains, followed by a pyritic halo ($> 2\%$ pyrite and $\leq 1\%$ chalcopyrite) in the more distal transition domain, and a peripheral halo ($< 1\%$ chalcopyrite and pyrite) in the propylitic zone. An additional fourth distinct sulfide body, known as the pyrite-rich zone, appears linked to the Braden pipe.

Taking these promising results into account, we have refined the analysis of these data by using machine learning algorithms (decision tree-based models) to infer specific controls on the chemical composition of chlorite and to improve its quantitative use as a proximity tool.

Samples and Methods

Datasets and pre-modeling stages

Chlorite compositional data were extracted from both Wilkinson *et al.* (2020) (LA-ICP-MS, $n = 651$) and Schulz (2020) (EPMA, $n = 270$; LA-ICP-MS, $n = 854$). EPMA and LA-ICP-MS data were processed as separate datasets, along with additional information, including sample location and distance from the deposit center, rock sample lithology (host rock), and records only available for the Adit71 chlorite (occurrence, texture, and interference color, Schulz, 2020; predominant hydrothermal alteration and sulfide halo in each rock sample, Carvajal, 2014; Heredia, 2018). Some chemical-derived variables (crystal-chemical parameters, element ratios, and sums) were also calculated and included. Distances from the Braden pipe in the Adit 71 transection were recalculated to consider the same center location defined by Wilkinson *et al.* (2020).

As machine learning models strongly rely on data quality, atypical compositional values and those affected by contamination with other mineral phases were excluded. This, however, introduces some uncertainty since there is no agreement on as to whether high concentrations of certain elements (particularly Ca, K, and/or Na) represent contamination or genuine incorporation in the chlorite lattice (Jiang *et al.*, 1994). Similarly, there is limited knowledge on the variability and abundance of trace elements in chlorite. Quality control criteria for LA-ICP-MS chlorite analyses are scarce, and their usefulness has not been properly verified and/or published. Consequently, we thoroughly analyzed mineral contamination in chlorite from the Adit71 considering its multi-elemental variability as well as textural and petrographic records. As a result, 28 EPMA and 475 LA-ICP-MS data were excluded. Although Wilkinson *et al.* (2020) mention that their chlorite data meet quality control criteria, further inspection revealed that 36 analyses suggest probable contamination and were also excluded.

As part of the validation criteria, values below the detection limit ($< \text{DL}$) were replaced by 0, while those elements with more than 30% of their values $< \text{DL}$ (Nb, Mo, Sn, Sb), as well as those associated with mineral contamination (LA-ICP-MS: Zr, REE, Y, Hf, Th, U, K, Ba, Rb, Tl, Cs) were also excluded. Finally, the validated datasets contain 242 EPMA and 994 LA-ICP-MS analyses, respectively.

Machine learning

Through exploratory data analysis (EDA) and preliminary observations, we set the objective of generating three classification models (1, 2 and 3) applied to chlorite from the Adit71 (Schulz, 2020), and one regression model (4) applied to chlorite from both works.

Models 1 and 2 were constructed to decipher the chlorite interference colors from its chemical composition using EPMA (model 1) and LA-ICP-MS (model 2) data, respectively, while model 3 aimed to establish relationships between chlorite chemical composition and the regional sulfide zonation in the different alteration zones; chlorite data from the pyritic-rich zone related to the Braden pipe was excluded from model 3 as it is a late feature overprinting an earlier sulfide zonation, and due to the few chlorite data available for this zone. Finally, model (4) was applied to the unified LA-ICP-MS dataset to predict the distance from the deposit center; only samples located up to $\approx 4,500$ m from the deposit center were input in this model to avoid the influence of other major hydrothermal systems such as La Huifa prospect. For all models, the predictor variables corresponded exclusively to chlorite chemical compositions.

Models were constructed using the free Scikit-Learn library (Pedregosa *et al.*, 2011) in Python. Classification models were addressed using the CART algorithm. The initial dataset was arbitrarily and iteratively divided in train (3/4) and test sets using the *Stratified Shuffle Split* CV iterator, while hyperparameters of interest were optimized considering the *GridSearchCV* tool and specific validation curves. The Gini index was chosen as the homogeneity criterion. On the other hand, we chose the Random Forest (RF) algorithm for the regression model. Here, chlorite chemical data were pre-processed using the Z standardization. The training set size was fixed to 2/3, the dataset partition was made with a *Stratified K Fold CV* and hyperparameters were optimized in parallel using the *GridSearchCV* tool, which provides several models built with different combinations of hyperparameter values. Classification and regression models were trained using the balanced accuracy score and the mean absolute error, respectively. Finally, we obtained an indicator of the importance variable for each model.

Results and Discussions

Confusion matrices for models 1, 2 and 3 are shown in Figure 1A left, center and right, respectively. Model 1 (balanced accuracy for all data ~ 0.84) clearly distinguishes chlorite with green-gray interference colors from the others based on a very low Fe content in the M1 site (XFeM1) (Figure 1B). Blue-violet interference colors are best distinguished by the high Fe contents in M1+M4 (XFeM1M4) sites. The values for XFeM1 for the brown-orange colors lies between the former two (Figure 1B). The highest number of wrong predictions (i.e., misclassified observations) involved brown-orange chlorite. Model 2 (balanced accuracy for all data ~ 0.83) classifies blue-violet chlorite by a $Mg/Fe < 0.613$ and distinguishes most of brown-orange from green-gray chlorite using $Ni+Zn > 416$ ppm. It also uses Na content to distinguish brown-orange from green-gray colors, but this criterion didn't work well. The tree tends to confuse green-gray or blue-violet with brown-orange chlorites. A detailed analysis indicates that mistaken predictions in models 1 and 2 are mainly related to chlorite showing more than one interference color at grain scale. Our results confirm that Fe content is a first-order control on the interference color of chlorite and suggest a possible role of cation distribution along octahedral sites. From the second model, we hypothesize that at a defined range of Fe/Mg values, the incorporation of divalent elements (mainly transition metals) such as Zn, Ni and Mn could have a second-order role in the origin of the brown-orange interference color in chlorite.

In the Adit71, green-gray chlorite are highly concentrated in the potassic domain and the proximal transition zone, while blue-violet and brown-orange colors are more common in the propylitic domain and/or the transition zone. Models 1 and 2 showed the strong relationship between chlorite interference colors and its chemical composition, therefore spatial variations in Fe and Mg reflect hydrothermal processes rather than host lithology in the Adit71. This is supported in the nearly homogenous mafic to intermediate composition in this tunnel (Heredia, 2018). We are not aware of previous studies documenting the spatial variation of chlorite optical properties; however, a decreasing of #Mg in chlorite away from other porphyry copper deposit centers has been recognized (e.g., Neal *et al.*, 2018), which is consistent with the spatial distribution of chlorite color in the Adit71. The distal enrichment of Fe, as well as Mn and Zn peak halos are probably the result of the outward advection and cooling of hypersaline brines enriched in these metals (Wilkinson *et al.*, 2015), making the interference color of chlorite a potential low-cost vectoring tool. Re-training models 1 and 2 with more data will not only allow us to better constrain our results but to recognize how much the interference color distribution is influenced by different host lithologies.

Model 3 classifies the sulfide halo in which chlorite has formed with a balanced accuracy of 0.83, only by using the Ti/Na ratio, V and Co contents. The ore halo is relatively well characterized by low Ti/Na ratios (< 3.64) and high V contents (> 424 ppm) in chlorite, while higher Ti/Na ratios and low Co (< 39 ppm) in chlorite is characteristic for the pyritic halo (Figure 1C). Interestingly, using the variables chosen by the model in a simple Co vs. V diagram makes it possible to distinguish not only the chlorite from the pyritic and marginal halos, but also the pyrite-rich zone, not considered in the CART model (Figure 1C). We interpret the Ti/Na ratio in chlorite as a proxy for distance to the deposit center, where higher Ti/Na values represent proximity to the center of the ore system. High V contents in chlorite from the ore halo is most probable the result of high temperature formation, but the effect of lithology was also suggested (Schulz, 2020). The Co-content in chlorite has also been recognized to be influenced by the host lithology (Schulz, 2020), however, the co crystallizing pyrite may impose the strongest constraint on this element. Chlorite in the pyritic halo is strongly depleted in Co which suggests that Co is preferentially incorporated in pyrite. Equally, the low Co contents in chlorite from the local pyrite-bearing phyllic domain in the Adit71 (Schulz, 2020), outside of the pyritic halo, supports this view. Model 3 has also been applied to predict on chlorite data reported in Wilkinson *et al.* (2020). Here, the associated sulfide halo for each rock sample was inferred based on the Cu content and location in the system. Most chlorite data were predicted as peripheral halo, whereas those predicted as pyritic halo were mainly distributed near the 0.5% Cu contour of the deposit. Except for host rocks with $Cu > \sim 2000$ ppm, the Cu content in the chlorite is roughly (positively) correlated with Cu values in the host rock. This suggest that chlorite may incorporate Cu in the absence of a Cu-sulfide phase. In summary, we propose that chlorite monitors metal mobility and precipitation related to sulfide mineralization.

Model 4 yielded a mean absolute error (MAE) of ~ 102 m and a root mean squared error (RMSE) of ~ 208 m. Main predictors are Sr and Ti, followed by As, Ca, Co, Zn, Cu and possibly Ni, Mn, Al and Li. SHAP values show that Sr, As, Ca, Co, and Li are more relevant by predicting greater distances, while Ti and to a lesser extent, Al, Zn, Mn, and V are more important in predicting the proximal distances. The RF model tends to overestimate the distance predicted in proximal chlorite, and to underestimate it in distal ones when all data are modelled (Figure 1D). The residue distribution shows absolute error highly concentrated under 200 m (Figure 1D). Still, these results are encouraging considering the multi-stage formation of El Teniente and the three-dimensional nature of the ore body, not contemplated in the model.

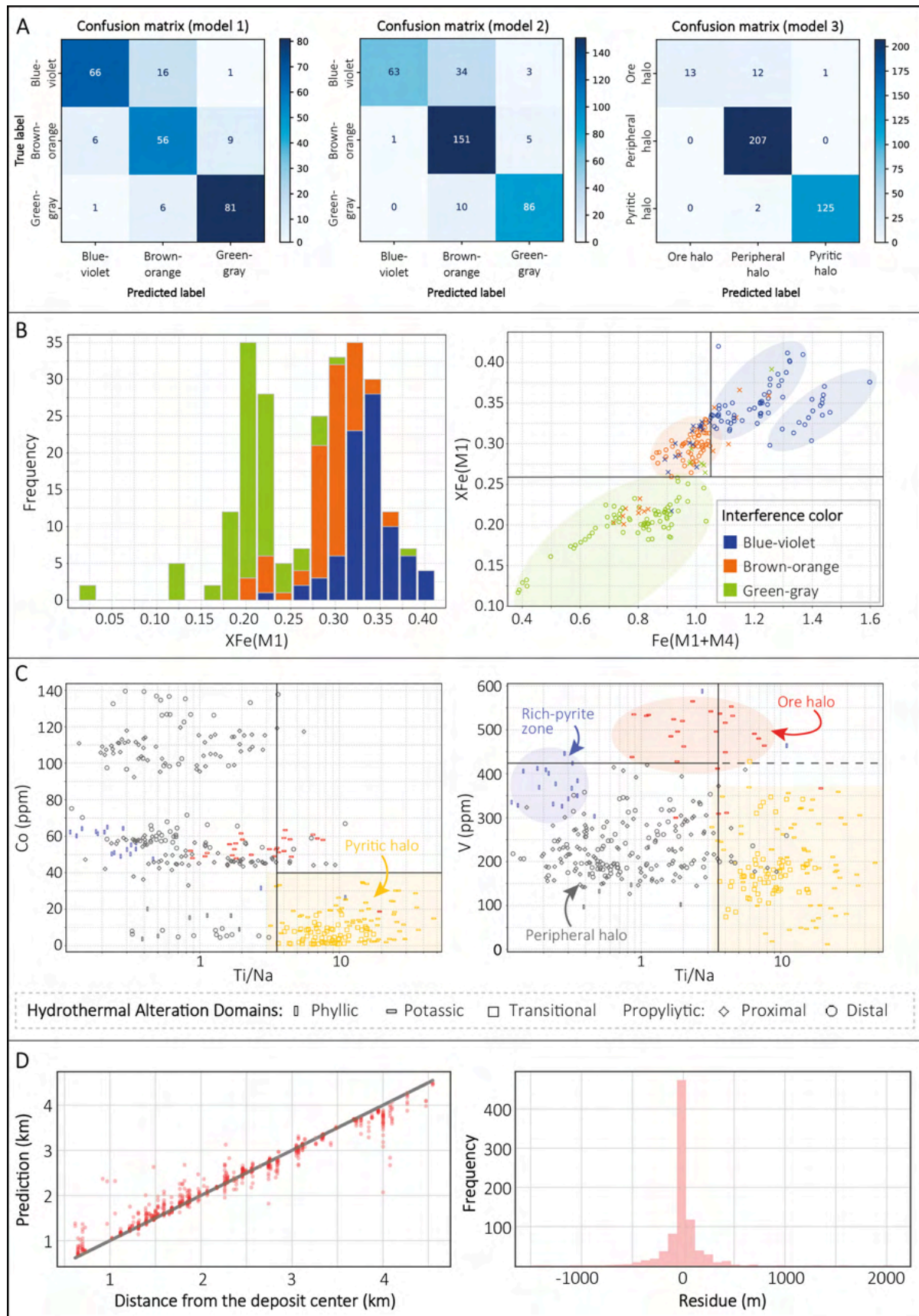


Figure 1. **A.** Confusion matrices for models 1, 2 and 3. **B** Interference color of chlorite vs. Fe content in M1 and M1+M4 sites. **C.** Chemical composition of chlorite of the different sulfide halos, including the pyrite-rich zone linked to the Braden pipe (excluded in the CART model). **D.** Model 4 predictions of the distance to the center of the El Teniente deposit.

Compared to the univariate regression of Wilkinson et al. (2020) (± 640 m, 1σ), model 4 shows a significant improvement (± 206 m, 1σ) in the quantitative use of chlorite as a vector. We attribute this enhancement to the significant differences between RF with respect to simple robust regression, where the former are multivariate, non-linear models, and robust with outliers but also with variable data distributions. In fact, in addition to Ti and Sr, the RF model recognizes other important variables that probably reflect mineralization processes (e.g., As, Co), implying that a multielemental approach enhances the use of the chlorite as a vector tool. The larger volume of data from our model may also have contributed to the higher performance achieved, as more data of quality is related to a better capacity of generalizing for the model. In this work, we consider the increasing data volume a minor contributor respect to the model differences, given that samples in Wilkinson et al. (2020) are associated to variable locations respect to the deposit center and are more spatially distributed, respect to the one-dimensional line that represents the Adit71 samples.

Like chlorite, epidote mineral chemistry has also been recognized as a potential tool in the exploration of porphyry copper deposits (Cooke et al., 2020), and both minerals occur together in the propylitic halo. We have run the same model 4 but adding epidote chemical data from El Teniente (Heredia, 2018; Wilkinson et al., 2020). Results show a slight improvement, yielding a residue of ~ 8 m with standard deviation of 153 m. In this chlorite-epidote model, Ga, Na, Sr, V, Bi, Sb, Cu and Ca were the most important discriminant elements in epidote. Although it incurs higher costs, a multi-mineral approach appears to be an even more powerful tool in targeting porphyry copper deposits.

Conclusions

Tree-based models applied to chlorite chemical composition significantly improves its use as a vectoring tool towards porphyry copper deposits. Models 1 and 2 have shown that Fe and possibly Ni, Zn and Mn controls the chlorite interference colors under the optic microscope, making it a potential low-cost tool for vectoring, as these elements are related to the magmatic-hydrothermal genesis of El Teniente. Model 3 elucidated the potential of chlorite for monitoring metal mobilization and sulfide precipitation. These conclusions highlight the importance of a detailed mineralogical-petrographic characterization of chlorite and their corresponding host rocks: it not only helps to better understand the controls on chlorite compositions but also constitutes potential predictor variables in future regression models. CART is a fast method of low computational cost, its implementation is relatively simple, and its results are graphically displayable, facilitating its interpretation for the geoscientific community. Moreover, tree-based models are particularly convenient when data input has many predictor variables, as they choose only those important for the classification/regression problem.

RF improved the quantitative use of chlorite as a proximator to porphyry copper deposit centers, with errors rarely higher than ~ 200 m. This model considers the thermal gradient of the deposit but also the mobilization/partition of elements during the migration of hydrothermal fluids, making it robust against infertile magmatic-hydrothermal systems. Since the El Teniente deposit is atypical in many respects (e.g., presenting most of the mineralization in a mafic host rock), integrating similar studies in other porphyry deposits should be carried out before applying the model to typical porphyry copper systems. Future works of ML applied to chlorite mineral chemistry in targeting porphyry copper deposits is expected to explore 1) more sophisticated algorithms such as gradient-boosted trees; 2) considering a multi-mineral approach (as suggested in this work); 3) including categorical predictor variables from optic microscopy; and 4) differentiating hydrothermal from non-hydrothermal (e.g., metamorphic) chlorite.

Keywords: data science, machine learning, chlorite vector, porphyry copper deposits, mineral chemistry.

References:

- Cooke, D. R., Agnew, P., Hollings, P., Baker, M., Chang, Z., Wilkinson, J. J., Ahmed, A., White, N. C., Zhang, L., Thompson, J., Gemmell, B. & Chen, H. (2020). Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper-gold-molybdenum deposits: detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), 176-188.
- Schulz, C. (2020). Química Mineral de las Cloritas Hidrotermales del Yacimiento El Teniente, Chile Central. "Implicancias en la exploración de pórfidos de cobre". Memoria para optar a título de Geólogo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra.
- Wilkinson, J. J., Baker, M. J., Cooke, D. R., & Wilkinson, C. C. (2020). Exploration targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry: A case study of the El Teniente deposit, Chile. *Economic Geology*, 115(4), 771-791.

Optimización de sondajes para la categorización de recursos basado en criterios geoestadísticos y optimización por enjambre de partículas

Daniel Baeza¹⁻⁶, Brian Townley¹⁻²⁻⁴⁻⁵, **Mohammad Maleki**¹⁻³, Elías Obreque¹⁻⁶, Nicole Reyes¹, Andrés Rivera¹, Marcelo Surjan¹, Rodrigo Zarate¹, Francisco Anguita¹

(1) GEA SpA, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(4) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(5) Geo Analytical Vision S.A., Santiago, Chile

(6) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

En minería, la clasificación de los recursos juega un rol fundamental en la evaluación de los proyectos desde la exploración hasta un yacimiento en operación. A lo largo de un proyecto reducir la incertidumbre en los modelos de estimación de recursos es una necesidad. La forma directa es la perforación de nuevos sondajes para obtener más información. Por otro lado, el costo de nuevos sondajes es uno de los más altos en este tipo de proyectos. Como consecuencia de estos dos puntos, la optimización de la ubicación de los sondajes es siempre de interés desde el punto de vista económico y estadístico.

En este trabajo presentamos una metodología que combina los criterios geoestadísticos con computación evolutiva para encontrar la ubicación del próximo sondaje que maximice la reducción de incertidumbre en los modelos estimados de yacimientos. Usando tres criterios distintos basados en varianza de kriging (Varianza de kriging, Varianza de kriging ponderada por ley y varianza combinada) es posible minimizar la incertidumbre de los modelos de estimación mejorando la posición, inclinación y orientación de los sondajes. Adicionalmente esta metodología entrega el orden de perforación óptimo de una campaña dando la opción al experto de disminuir los costos de operación haciendo menos sondajes de los proyectados para un umbral de incertidumbre objetivo.

En esta presentación se muestra el resultado de la ubicación de 5 sondajes adicionales optimizando sus ubicaciones con la metodología propuesta (Combinación de criterios geoestadísticos y optimización por enjambre de partículas) en un yacimiento de pórfido de cobre. Los resultados obtenidos se compararon con ubicaciones de 5 sondajes adicionales a las ya existentes en la zona de estudio recomendados por los geólogos del yacimiento usado en el caso de estudio. La comparación demuestra un aumento significativo en recursos medidos en el caso de uso de metodología propuesta.

Palabras Clave: varianza de kriging, clasificación de recursos, optimización por enjambre de partículas, geoestadística.

Referencias:

- Soltani-Mohammadi, S., Safa, M., Mokhtari, H., 2016. Comparison of particle swarm optimization and simulated annealing for locating additional boreholes considering combined variance minimization. *Comput Geosci* 95, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.020>.
- Soltani-Mohammadi, S., Safa, M., Sohrabian, B., 2021. Reducing Uncertainty in Mineralization Boundary by Optimally Locating Additional Drill Holes Through Particle Swarm Optimization. *Natural Resources Research* 30, 2067–2083. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09820-w>.
- Soltani, S., Hezarkhani, A., Erhan Tercan, A., Karimi, B., 2011. Use of genetic algorithms in optimally locating additional drill holes. *Journal of Mining Science* 47. <https://doi.org/10.1134/S1062739147010084>.

Impacto en la toma de decisiones de exploración mineral aplicando ciencia de datos e inteligencia artificial a datos geoespaciales

**Marcia Ojeda Carreño¹⁻²⁻³, Felipe Navarro Vargas¹⁻²⁻³, Felipe Garrido Rodríguez¹⁻²⁻³, Gonzalo Díaz Rodríguez¹⁻²⁻³,
Rocío Núñez Tapia¹⁻²⁻³, Alejandro Ehrenfeld García¹⁻²⁻³, Álvaro Egaña Viedma¹⁻²⁻³**

(1) Advanced Laboratory for Geostatistical Supercomputing, ALGES, Universidad de Chile, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

El presente trabajo analiza cómo impacta el orden cronológico del uso de información disponible en una campaña de exploración mineral en la toma de decisiones. En este estudio se compara una campaña de sondeos tradicional con una campaña creada a partir de mapas de exploración creados con la herramienta basada en inteligencia artificial. Para lograr esto, se seleccionó un caso práctico de un yacimiento con datos asociados a varias fechas de adquisición, lo que permitió la creación de diferentes escenarios que representan distintas fases del proceso de exploración. La primera fase involucra un conjunto limitado de datos, que posteriormente se incrementaron en los escenarios subsiguientes. Los datos utilizados incluyeron, información superficial que se categoriza en mapas litológicos y de alteración hidrotermal, geometría de las estructuras geológicas, campañas de geoquímica superficial, datos geocronológicos superficiales, mapa de elevación digital y campañas de sondeos.

La información disponible es en su mayoría superficial y discreta, lo que resulta en una extensa área de estudio con datos desconocidos. Para poder usar la información, se propuso procesar los datos para que la información quede en un mismo soporte y abarcara el área de estudio. Cada categoría se trató individualmente en forma de capas continuas de información espacial, obtenidas mediante modelos numéricos. Una vez generadas las múltiples capas de información, se procedió a generar capas adicionales mediante filtros (derivadas, shearlets, entre otros), con el fin de obtener una nueva perspectiva de los datos y realizar un análisis exhaustivo del comportamiento de las variables en estudio.

Para analizar el efecto de la utilización temporal de la información, se idearon diversos escenarios. En el escenario inicial, se asignó únicamente información superficial incluyendo las capas de geoquímica superficial, mapas estructurales y de alteración, datos geocronológicos, entre otros. Después de seleccionar y procesar los datos correspondientes, se generó un mapa de probabilidad de target de exploración. Para ello se aplicó un algoritmo de inteligencia artificial, basado en una regresión logística, donde se entrenó el sistema por medio de criterio experto para encontrar áreas probables de target de exploración. Para el siguiente escenario, en función del mapa de probabilidad generado en el escenario anterior, se seleccionaron lugares específicos para determinar un número acotado de sondeos. Los valores de leyes de estos sondeos se incorporaron como nuevas capas de información, mediante estimación geoestadística, y se procedió nuevamente a correr la metodología de generación de mapas de probabilidad. El impacto que generó el incorporar la información de los sondeos modificó el mapa de probabilidad acotando las áreas de probabilidad de target de exploración.

La conclusión derivada de los resultados del experimento presentado muestra que el mapa de probabilidad resultante, generado mediante la combinación de algoritmos de inteligencia artificial y el criterio experto, se ve claramente influenciado por la utilización de nuevas capas de información. Se sugiere de manera preliminar que la metodología presentada en este estudio tiene el potencial de optimizar la eficiencia en la gestión de campañas de exploración al agilizar el proceso de identificación o descarte de proyectos. Esto es posible porque los mapas de probabilidad tienen la finalidad de señalar zonas de posibles depósitos, lo que delimita el área de exploración, tal como se ejemplifica en el caso actual basado en datos de una campaña de exploración real. El uso de esta herramienta podría simplificar la toma de decisiones para los equipos involucrados, al proporcionar una guía sobre dónde asignar recursos adicionales para la exploración. Además, existe la posibilidad de que esta metodología reduzca la cantidad de perforaciones necesarias durante una campaña, lo que llevaría a una asignación más efectiva de recursos y una mayor eficiencia en el proceso de exploración, adelantando incluso en algunos años las etapas de exploración.

Palabras Clave: ciencia de datos, exploración mineral, inteligencia artificial, datos geoespaciales.

Thinskette: Hacia un análisis automatizado y confiable de láminas delgadas de roca

Felipe Andrés Troncoso Angulo¹

(1) Universidad Santo Tomás, Geología, Facultad de Ingeniería, Ejército Libertador #146, Santiago, Chile

El presente estudio se enfoca en la creación e implementación de "**THINSKETTE**", un software innovador diseñado para clasificar y describir automáticamente secciones delgadas de roca. Este avance tecnológico tiene como objetivo optimizar la eficacia, precisión y consistencia en la identificación de minerales y estructuras geológicas, fundamentales en la petrografía y en la geología en su conjunto.

El proceso comienza con la adaptación y modificación de un sistema existente de captura de imágenes de microscopio petrográfico, conocido como PiAutoStage. Este sistema se emplea para **generar una base de datos consistente** y diversa de imágenes de 20 secciones delgadas de rocas ígneas intrusivas en dos configuraciones: luz transmitida con y sin polarizador. Mediante la adaptación del sistema, se pueden capturar imágenes desde diferentes ángulos de incidencia, lo que permite una representación más completa y detallada de las muestras. Se obtiene un total de 320 fotografías por configuración de luz por cada corte. Es decir un total de 640 imágenes por corte.

Dado el carácter cristalino de las rocas, se contempla la variabilidad de los minerales según el ángulo de incidencia de la luz para lograr una representación realista en condiciones de laboratorio. Esto conlleva a la creación de una **imagen n-dimensional** (stack) o de un video que muestre las variaciones a lo largo de los 360° de incidencia de la luz, emulando prácticas consolidadas en medicina y marcando un hito en geología.

Posteriormente, se implementan y evalúan varios **modelos de clasificación de imágenes** existentes utilizando diversos algoritmos de aprendizaje automático, entre ellos las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado, Redes Neuronales Recurrentes (RNN), CNN 3D, Redes Neuronales Generativas Adversarias (GAN), y otros. Esta evaluación busca determinar la eficacia de cada uno en la identificación y clasificación de las características de las imágenes de las secciones delgadas de roca. Para entrenar los modelos solo se consideran minerales formadores de rocas (silicatos) tradicionales, en rocas ígneas intrusivas.

Se **verifica la precisión** del programa clasificador "THINSKETTE" al contrastar las descripciones generadas por el software con las efectuadas por expertos en la materia. El error esperado permitido debe ser inferior al 10%.

La relevancia de esta herramienta en el proceso de descubrimiento de recursos minerales radica en su capacidad para **reducir los tiempos** de descripción de los cortes transparentes. Otro aspecto relevante es que un software de este tipo, permitiría integrar los cortes históricos de un proyecto específico dentro de un modelo de reconocimiento, permitiendo contrastar las descripciones ofrecidas por la herramienta con un **modelo único** entrenado con la información geológica propia del proyecto. Finalmente, la digitalización de los cortes transparentes pone a disposición nuevos conjuntos de datos que pueden ser trabajados bajo la lógica de la **ciencia de datos**, para encontrar posibles tendencias y relaciones, creando así nueva información disponible.

Palabras Clave: lámina delgada, mineralogía, aprendizaje automático, software, visión artificial

Referencias:

- Steiner, R. A., & Rooney, T. O. (2021). PiAutoStage: An open-source 3D printed tool for the automatic collection of high-resolution microscope imagery. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009693. <https://doi.org/10.1029/2021GC009693>.
- Mario Del Rosario, Hannah S. Heil, Afonso Mendes, Vittorio Saggiomo, and Ricardo Henriques. (2022). The Field Guide to 3D Printing in Optical Microscopy for Life Sciences. *Advanced Biology*, Vol 6, Issue 4, 2100994. <https://doi.org/10.1002/adbi.202100994>.

Determinación de molibdenita (MoS_2) y minerales asociados en testigos de perforación mediante Espectroscopía de Plasma Inducida por Láser (LIBS)

Iván Arévalo Rossel¹, Germán Velásquez Acosta¹, Jorge Yáñez Solorza², Claudio Sandoval Muñoz², Benjamín Sepúlveda Marín², Jonnathan Álvarez Fuentes¹

(1) Universidad de Concepción, Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Laboratorio de Trazas Elementales y Especiación, Departamento de Química Analítica e Inorgánica, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

El molibdeno (Mo) es un metal gris plateado que se encuentra en los yacimientos de pórfidos de Cu-Mo, alojado principalmente en el mineral molibdenita (MoS_2), siendo considerado un subproducto de las operaciones de extracción de cobre. En 2021, Chile exportó alrededor de 50 mil toneladas métricas de concentrado, siendo Chile el segundo productor mundial de molibdeno [1]. La determinación de la concentración de molibdeno en los testigos de sondaje es esencial para conocer el potencial económico de este recurso en estos yacimientos. Resulta indispensable contar con métodos de caracterización eficaces para determinar las reservas que puedan ser explotables. Actualmente, proyectos de exploración pueden demorar hasta 3 años en su aprobación y es el análisis de muestras de sondajes la actividad que conlleva más tiempo. La caracterización geológica de sondajes puede resultar no 100% reproducible de uno a otro mapeo, por razones como: complejidad en la litología y alteraciones, además del factor humano, ya que el geólogo debe analizar cada metro dependiendo de su experiencia y mermado por la fatiga laboral de turnos extensos que pueden producir errores en las mediciones. Adicionalmente, la caracterización incluye análisis químicos en roca total, procedimientos que son demorosos, generadores de residuos dañinos, con tratamientos que conllevan costos monetarios y ambientales elevados en la cadena de valor minero.

La espectroscopia de plasma inducida por láser (LIBS) emerge como una opción viable para el estudio y caracterización de testigos de sondajes, ideal para el análisis elemental requiriendo tratamientos de muestras mínimos y que pueden proveer información de la localización espacial del mineral de interés [2]. LIBS consiste en un láser pulsado de alta energía (10^{12} W/cm^2) enfocado sobre la superficie de un material, generando un plasma compuesto por átomos e iones excitados electrónicamente. Cuando estos átomos vuelven a su estado fundamental, emiten longitudes de onda características captadas por un espectrómetro óptico que finalmente produce un espectro de emisión atómica [3]. Este trabajo propone el uso de LIBS y métodos multivariados quimiométricos para determinar molibdenita en testigos de sondaje y otros minerales asociados para proveer información adicional en procesos metalúrgicos posteriores.

Se caracterizaron 3 especímenes (briquetas pulidas) de roca contenedoras de molibdenita a través de métodos convencionales como microscopía óptica y QEMSCAN. Luego estas muestras fueron analizadas mediante una configuración LIBS compuesta por un cabezal láser Nd-YAG de 1064 nm y un pulso energético de hasta 300 mJ/pulso y una duración de 6 ns (Nano LG300-10, Litron Lasers, Warwickshire, UK). La detección fue realizada bajo condiciones ambientales, con un espectrómetro CCD de 6 canales, un rango espectral desde 185 a 1.049 nm y una resolución promedio de 0.12 nm. El tiempo de retardo utilizado fue 0,7 μs y el tiempo de integración 1,05 ms. La resolución espacial de análisis alcanzó aproximadamente los 200 nm por píxel. Los resultados conseguidos proveen señales de molibdeno, cobre (Cu), hierro (Fe), azufre (S), además de otros elementos contenidos en la matriz como el silicio (Si), aluminio (Al), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Las señales obtenidas junto a métodos quimiométricos permitieron generar mapas de distribución elemental relacionado con las concentraciones de las especies minerales presentes. Esto permite estimar que los ensayos realizados son prometedores, pudiendo discriminar de manera correcta especies minerales presentes en los materiales de estudio, alcanzando resoluciones aceptables para la configuración LIBS disponible y además cuantificar su concentración. Por otro lado, es posible analizar este tipo de muestras en condiciones muy diferentes a las operativas por los métodos convencionales como QEMSCAN, obteniendo mejor sensibilidad y capacidad de detección para elementos más ligeros o que poseen dificultades analíticas mediante métodos basados en la fluorescencia de rayos x.

Palabras Clave: Molibdeno, LIBS, Geoquímica, Mineralogía, Quimiometría.

Financiamiento: Este proyecto se encuentra financiado por Fondecyt Iniciación 2023, N°11230695.

Agradecimientos: Fondecyt N°1231470, Fondef VIU22P0038, y Postdoctorado N° 74220056. Al Instituto GEA, al Dpto. de Química Analítica e Inorgánica, Dpto. Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ciencias Químicas, UdeC.

Referencias:

- [1] COCHILCO, Anuario de Estadística de Cobre y Otros Minerales, 2002-2021 (2022).
- [2] R. S. Harmon, Applied Geochemistry, 128, (2021).
- [3] Moncayo, S., et al., Exploration of megapixel hyperspectral LIBS images using principal component analysis. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018. 33(2): p. 210-220.

Visualizador geoquímico ambiental en Chile. Plataforma interactiva para big data de Hidroquímica y Geoquímica

Gabriel Basaez¹, Damián Cruz Barrientos¹, Álvaro Antonio Navarrete Calvo¹⁻², Camilo Sánchez¹⁻²

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de ciencias, Ingeniería y tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(2) Cobrizo Geología Ambiental, Linares, Región del Maule, Chile

Actualmente en Chile existen diversas plataformas digitales en internet destinadas a funcionar como repositorios de información de calidad de aguas, hidrología y geoquímica, permitiendo descargar diferentes bases de datos crudos o levemente procesados, entre ellas Hydrus, Portal Geomin del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y Observatorio Georreferenciado de la Dirección General de Aguas (DGA). Sin embargo, no existe una plataforma que permita manipular, analizar y visualizar de forma interactiva, información georreferenciada con criterios hidrogeoquímicos, que facilite una clasificación, comprensión e interpretación preliminar acerca del origen o procesos de interacción agua-roca a partir de grandes bases de datos de hidroquímica y geoquímica, o de calidad química ambiental.

De esta manera, los análisis exploratorios de este tipo de antecedentes requieren la inversión de una gran cantidad de tiempo en búsqueda, descarga y procesamiento de datos; los cuales podrían realizarse con herramientas de programación y manejo de bases de datos. Es por esto que en este trabajo se propone la creación de un portal digital e interactivo, que ponga a disposición de cualquier usuario un mapa de Chile con los datos disponibles de las estaciones de calidad de agua de la DGA, así como también los datos de geoquímica de rocas y suelos obtenidos como datos crudos de EarthChem y SERNAGEOMIN, respectivamente. El objetivo de esta herramienta es poner a disposición de investigadores en ciencias de la Tierra y usuarios generales, una plataforma de creación de una gran variedad de gráficos técnicos, que ayuden a representar un gran conjunto de datos, facilitando el análisis, interpretación y gestión del tiempo en fases analíticas.

El desarrollo de esta plataforma se basó en el uso de Rstudio, una herramienta de programación de código abierto. Se utilizaron diversas librerías, como "ggplot", "plotly" y "leaflet", pero destaca especialmente "Shiny", que permite unificar las diferentes librerías para formar esta página interactiva. Aunque la plataforma aún está en construcción, se espera lanzarla a finales del presente año.

A través de la interfaz de este portal web, los investigadores podrán seleccionar áreas de interés específicas desde mapas interactivos y aplicar filtros a la información relevante, como estaciones de monitoreo, parámetros químicos, fechas de muestreo o rangos de fechas de medición, y sus variaciones composicionales. Entre los gráficos hidroquímicos y geoquímicos específicos que se incorporarán se encuentran los diagramas Piper, Stiff, gráficos bivariados para parámetros físico-químicos, elementos químicos o razones de estos, series de tiempo y boxplots para hidroquímica. Para la geoquímica de rocas, se incluirán diagramas spider y concentración de elementos mayoritarios. Además, se proporcionarán indicadores de geoquímica ambiental, como el factor de enriquecimiento, índice de geoacumulación e índice de contaminación, y se compararán con las normas de calidad ambiental internacional y nacional para cada matriz.

Este portal será gratuito y contará con una interfaz sencilla y amigable para los usuarios, lo que permitirá democratizar el acceso a la información y facilitar la visualización, clasificación y análisis de los datos recopilados de manera más efectiva y eficiente, optimizando así la gestión del tiempo. Esta representación visual también puede ayudar a identificar patrones espaciales y temporales, así como anomalías hidrogeoquímicas, mejorando la capacidad de los investigadores para realizar interpretaciones informadas y obtener conclusiones significativas. En el futuro, estos hallazgos podrían utilizarse para resolver problemáticas en diversas áreas, como medio ambiente, recursos hídricos, minería, gestión del agua, investigación científica y análisis espaciales, entre otras.

Palabras Clave: Plataforma interactiva, Geoquímica ambiental, Geobig data, Hidrogeoquímica, Programación.

Aplicaciones de inversión bayesiana para la determinación de propiedades hidrológicas y cuantificación de incertidumbre a partir de datos geofísicos

Juan Bascur¹, Gonzalo Yáñez Carrizo¹

(1) Pontificia Universidad Católica, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

Las metodologías geofísicas son ampliamente utilizadas en estudios de aguas subterráneas, debido a que permiten obtener imágenes del subsuelo con amplia cobertura a bajo costo. Sin embargo, su interpretación hidrológica cuantitativa puede ser desafiante considerando las incertezas provenientes de relaciones petrofísicas no calibradas, la no unicidad de solución de la inversión geofísica (Tarantola, 2015) y/o las limitaciones de sensibilidad y resolución de las metodologías geofísicas (Bintley et al. 2015). Estas incertezas pueden producir sesgos importantes en los modelos y predicciones hidrológicas derivados a partir de datos geofísicos y son necesarias cuantificarlas para una interpretación adecuada.

En este trabajo se propone una metodología de inversión híbrida bayesiana que combina el uso de datos geofísicos con el modelamiento hidrológico para investigar propiedades hidrológicas del subsuelo (nivel de agua, geometría de acuífero, porosidad, saturación, conductividad hidráulica). En este enfoque, los parámetros hidrológicos se expresan a través de funciones de probabilidad condicional que describen la incertidumbre o error resultante de su estimación con datos geofísicos. La inversión híbrida bayesiana es resuelta mediante la aplicación novedosa del algoritmo de maximización de la esperanza (EM) (Dempster et al 1977), permitiendo reducir el costo computacional y habilitando la implementación mediante la reutilización de códigos de modelamiento geofísico e hidrológicos tradicionales sin necesidad de modificación (Simpeg, Pygimli, Resipy. etc.).

Para evaluar la inversión híbrida bayesiana se presentan ejemplos con la aplicación de datos geofísicos investigando acuíferos subterráneos. Primero, se analizan los resultados de casos sintéticos con datos de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y transiente electromagnético (TEM). Segundo, se utilizan datos de ERT para determinar el contenido de agua infiltrado en el sitio de pruebas geofísicas-hidráulicas de la Pontificia Universidad Católica (PUC). Tercero, se investiga la incertidumbre asociada al uso de datos gravimetría y TEM (DGA-Aquaterra, 2011, DGA-Subterránea, 2015) para determinar la geometría de la cuenca del río Itata en el valle central.

Los resultados indican que la inversión híbrida bayesiana es una metodología efectiva para obtener información hidrológica, y cuantificar su incertidumbre, partiendo de datos geofísicos. No obstante, la precisión de parámetros hidrológicos derivados de datos geofísicos puede ser baja cuando se utilizan relaciones petrofísicas de baja precisión. En estas situaciones, el uso de las funciones de densidad condicional es un medio más adecuado para utilizar esta información hidrológica considerando sus incertidumbres

Palabras Clave: Hidrogeofísica, Geofísica, Aguas Subterráneas, Inversión Geofísica, Cuantificación de Incertidumbre.

Referencias:

- Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Revil, A., Robinson, D. A., Singha, K., and Slater, L. D. (2015), The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales, *Water Resour. Res.*, 51, 3837– 3866, [doi:10.1002/2015WR017016](https://doi.org/10.1002/2015WR017016).
- Dempster, A.P.; Laird, N.M.; Rubin, D.B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical.*
- DGA-Aquaterra. (2011). Estudio hidrogeológico en las cuencas Bío Bío e Itata. Cuenca Itata. Tomo I, Informe final. S.I.T N° 258. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas: 362 p. Santiago.
- DGA-Subterránea. (2015). Análisis y aplicación metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos en la provincia de Ñuble, VIII región. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas: 122 p. Santiago.
- Tarantola, Albert. (2005). Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. [doi: 10.1137/1.9780898717921](https://doi.org/10.1137/1.9780898717921).

Propuesta de mejora en el procesamiento de datos y entrega de resultados para la datación radiométrica U-Pb en circones por el método LA-ICP-MS en el Laboratorio de SERNAGEOMIN

Angelina Antonieta Bustos Tapia¹, Marco Suárez¹, Javiera Salazar¹, Andrew Tomlinson¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Laboratorios, Santiago, Chile

El Departamento de Laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) realiza dataciones radiométricas de U-Pb en circones por el método LA-ICP-MS, técnica utilizada a nivel mundial para realizar estudios geológicos. Si bien, existen metodologías transversales e internacionales para la forma de reportar los resultados y/o la cuantificación de los errores aleatorios y otros errores sistemáticos independientes del dato mismo, no necesariamente son directrices seguidas por todos los laboratorios y responden a una metodología propia de cada institución y/o laboratorio que reporta. Por lo que, desde el año 2012 el equipo ha implementado diferentes mejoras, como la adición de un tercer estándar de corrección en la muestra y, actualmente, se está trabajando en cuantificar el sesgo asociado a la medición de estándares secundarios y cómo reportarlos.

El laboratorio de U-Pb, está equipado con un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (HR-ICP-SF-MS), modelo Element XR de la marca Thermo Fisher, un láser de ablación, modelo Analyte G2 de la marca Photon Machine, y de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), con el cual se obtienen imágenes de catodoluminiscencia (CL) y electrones retrodispersados (BSE) de los circones a datar. Como metodología, utilizamos un estándar primario, GJ-1 $\approx$ 609 Ma, y dos estándares secundarios, Plesovice $\approx$ 337 Ma y Mudtank $\approx$ 732 Ma. Adicional a estos, junto a los circones a datar, se dispone de un tercer estándar secundario, Temora 2 $\approx$ 417 Ma, para corregir desviaciones producto de la posición de la muestra en la bandeja de ablación láser.

En este trabajo proponemos calcular e informar la propagación de incertezas según las recomendaciones internacionales, como también entregar la información de todos los datos obtenidos, tanto de las muestras como de todos los estándares utilizados en la medición, con el objetivo de dar la opción al usuario de recalcular los datos si lo requiere. Además, asumiendo que el error de la edad reportada depende de las concentraciones naturales de U y Pb, proponemos estimar la incerteza de las edades medidas, mediante las concentraciones promedio de U y Pb en los estándares secundarios, los cuales poseen su respectivo sesgo de medición que debe ser presentado. También, se propone reportar la corrección en base al estándar asociado a la posición de las muestras en la bandeja de ablación láser. Se considera aceptable una medición donde la corrección por posición no sea mayor al 5%, lo mismo que para el sesgo de los estándares secundarios medidos, mientras que, para el sesgo calculado de la muestra respecto a los estándares secundarios, no debe superar el 2%. Todos estos cálculos deben ser reportados para asegurar la calidad de la medición. Así, el laboratorio podrá entregar edades más confiables y definir los límites de medición de nuestro laboratorio con el equipamiento existente.

Palabras Clave: U-Pb, Geocronología, Circones, Análisis de Datos, LA-ICP-MS.

Financiamiento: SERNAGEOMIN.

Agradecimientos: Unidad de Mineralogía del SERNAGEOMIN.

Evaluación de PIV granular en la generación de datos cuantitativos en deformaciones dinámicas superficiales de procesos mineros

Francisco Wilton Nuñez¹, Pamela Paz Jara¹

(1) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería

Las deformaciones superficiales no solo tienen la importancia de ser una variable crítica en la generación de modelos predictivos de la dinámica superficial causadas por las labores y explotación de la minería subterránea y de superficie, también pertenece a una variable crucial de seguridad del personal e infraestructura, y de la etapa del proyecto en sí. Para controlar, mitigar y cuantificar los desplazamientos, depresiones y fracturas de la superficie, se realizan monitoreos con herramientas de teledetección o mediciones en terreno, las cuales exponen doblemente al personal a un riesgo o simplemente las técnicas no son las más indicadas ya sea por su precisión, complejidad de operación, interpretación, elevados costos o peligro en faena. El objetivo de este estudio es evaluar la factibilidad técnica en la implementación de la metodología PIV granular en la obtención de datos cuantitativos de las deformaciones superficiales en minería.

Para ello se utiliza un algoritmo de correlación de imágenes a distancia denominado Particle Image Velocimetry (PIV), ampliamente usado en hidromecánica, y se realizan pruebas de testeo de variables críticas en un modelo analógico de subsidencia para la cuantificación y obtención de vectores de desplazamiento y velocidad en material textural, llamando al método, PIV granular. Se realizan pruebas en datos in-situ de terceros para evaluar la factibilidad técnica en faena y se testea el método con imágenes satelitales normales e hiperespectrales en varios escenarios temporales y condiciones de obtención de los datos, así como una optimización del algoritmo.

Los datos del modelo analógico muestran que un aumento en las pasadas en la utilización del algoritmo en áreas de interrogación de correlación más pequeñas aumenta la población y definición del sentido de movimiento de los vectores de 0,018[mm/s] con 1 paso a 0,035 [mm/s] para 4 pasadas del algoritmo, el área inicial de interrogación condiciona la probabilidad de encontrar vectores válidos, y la resolución de la imagen impacta en la población de vectores pasando de 9293 con 20 Mpx a 1023 con 3,3 Mpx, un material con alta reflectividad puede pasar de una media de 0,018[mm/s] a 0,028[mm/s] por el aumento del ruido y vectores erróneos mientras que una grilla en imágenes de baja resolución aumenta la generación de vectores válidos. En faena se obtienen velocidades medias del material en un banco en periodos ínfimos de tiempo de 226 [ms], cuantificando el desplazamiento de 2,76, 1,65, 0,98 y 0,39 [px/frame] en 4 periodos continuos.

Los datos satelitales muestran sesgos considerables en la precisión de los vectores en zonas específicas cuando la diferencia en las condiciones de reflectancia en la superficie entre periodos es ligeramente diferente, cuando las condiciones son ideales es posible obtener velocidades en la deformación en periodos largos de tiempo, en 360 días cuantificando 1,82 [px/frame] y en un periodo de 730 días, 1,9 px/frame. La utilización de imágenes hiperespectrales impactan hasta en un 9,3 % la media de los resultados para un largo periodo (sobre 6 meses de intervalo, cuando es apreciable un desplazamiento de área superficial considerable por la subsidencia, en este caso, en intervalos de 360 y 730 días), y hasta un 23% en periodos corto (5 días, mínima frecuencia de obtención de imágenes por parte del par de satélites utilizados), disminuyendo el "ruido" general de vectores obtenidos que se produce en imágenes de color natural. La optimización del algoritmo en hardware puede disminuir hasta 42 veces el tiempo de cómputo gracias a el ancho de banda, transistores modernos y cálculo paralelo en GPU.

El estudio revela que es factible la obtención de datos cuantitativos de las deformaciones superficiales en procesos mineros, en un rango establecido de escenarios donde las variables críticas de reflectancia, calidad del dato, resolución, pasos y área de interrogación son importantes de controlar. Este estudio muestra que es factible su implementación como método alternativo o de apoyo a otros de teledetección, siendo el CAE del PIV 13.629 y 40.501 US\$ menos costoso en comparación a las técnicas LiDAR e InSAR respectivamente.

Palabras Clave: PIV; Monitoreo; Subsidencia; Imagen satelital; Dinámica de suelo; algoritmo correlación cruzada

Agradecimientos: Agradecimientos al Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile, DIMIN-USACH, por apoyar este estudio por medio de los fondos de "Apoyo al trabajo de titulación".

Referencias:

- Wilton, F. 2022. Evaluación de PIV granular en la generación de datos cuantitativos en deformaciones dinámicas superficiales de procesos mineros. Trabajo de titulación para Ingeniería Civil en Minas. Departamento de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile. Prof. Guía: Pamela Paz Jara Muñoz.

Nueva metodología de limpieza y fusión de muestras de geología marina para datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Paola Martínez Escobar¹, Luis Yáñez¹, Luis E. Lara¹⁻²⁻³, Javiera Salazar¹, Eugenia Fonseca¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento Laboratorio, Til Til 1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

(2) Universidad Austral de Chile

(3) Instituto Milenio Ckelar Volcanes

Durante el desarrollo de proyectos de Geología Marina en el Departamento de Geología General de SERNAGEOMIN, en estrecha relación con proyectos Fondecyt en esa misma línea, surgió la necesidad de trabajar con muestras de lavas que se formaron y/o pasaron tiempo bajo el mar, y que, a causa de esto, presentaban distintos grados de alteración.

Históricamente, el laboratorio de SERNAGEOMIN ha declarado no aptas para datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por masa fundamental muestras de lavas alteradas. Esto dado que, al momento de producirse la alteración, el sistema cristalino se abre al medio, alterando el contenido total de potasio y argón, por lo que la edad calculada puede no ser representativa de la edad de formación o enfriamiento. Adicionalmente, una muestra muy alterada puede contaminar seriamente el espectrómetro al momento de su medición. Sin embargo, es conocida la experiencia de otros laboratorios con muestras de esta misma naturaleza y de esto surge el desafío de mejorar la estrategia de análisis.

Debido al alto porcentaje de muestras no aptas, surgió primero la necesidad de experimentar con distintos métodos de limpieza. Primero, se identificaron las alteraciones comunes de la masa fundamental: iddingsita, palagonita y hematita. Segundo, basado en la experiencia comparada, se generaron métodos de limpieza que permitieran disolver la alteración sin dañar los minerales a datar. La secuencia de lavado final consistió en cuatro pasos, donde la muestra se trató consecutivamente con HCl 1N, HCl 6N, HNO₃ 1N y HNO₃ 3N. Entre cada lavado, la muestra se enjuagó con agua destilada para eliminar restos de ácido. Una vez lavadas las muestras, estas fueron analizadas por Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para obtener una aproximación cualitativa de la eficacia del lavado. Una fracción de las muestras sometidas a la limpieza especial, fueron irradiadas en el reactor nuclear de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y medidas en el espectrómetro de masa MAP 215-50 en el laboratorio de SERNAGEOMIN. En este equipo se desarrolló un nuevo método de análisis, modificando la secuencia de fusión y medición para optimizar los pasos de limpieza. Este nuevo protocolo busca que en la fusión a bajas temperaturas se pueden eliminar las impurezas que afectan la obtención de una edad *plateau*.

Los resultados preliminares, sobre la eficacia de la limpieza, no fueron concluyentes al estudiar las muestras vía DRX. Los espectros estudiados mostraban los minerales asociados a la masa fundamental pero no permitieron distinguir los minerales de alteración. El análisis SEM entregó mejores resultados. En él pudimos distinguir una disminución en el porcentaje de magnesio y hierro total de la roca, asociado probablemente a la desintegración de la iddingsita y hematita, minerales de alteración principales de estas muestras. No se aprecia una variación importante en el calcio. La cantidad de potasio en la muestra se observa constante, elemento fundamental para este método radiométrico. Esperamos que esta nueva metodología entregue edades *plateau* óptimas en muestras que en el pasado no era factible medir en SERNAGEOMIN ampliando así las capacidades analíticas para el estudio del volcanismo submarino.

Palabras Clave: Datación, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Geología Marina, Espectrómetro

Procesamiento de muestras ambientales para cuantificación de radiocarbono (^{14}C) en Chile, desde la toma de muestras hasta la grafitización

Consuelo Martínez Fontaine¹, Silvana Collado Fabbri¹, Alejandra Beattie Cruz¹

(1) Crono Austral, Punta Arenas, Chile

La cuantificación de radiocarbono (^{14}C) de muestras ambientales tiene múltiples aplicaciones en las Ciencias de la Tierra. Por ejemplo, permite fechar materia orgánica, sedimentos y/o carbonatos y así robustecer las cronologías de registros estratigráficos, fechar registros paleontológicos, caracterizar acuíferos, y estudiar el ciclo del carbono. El ^{14}C es un isótopo radiactivo de carbono que se produce en las zonas altas de la atmósfera, donde rayos cósmicos de alta energía resultan en la emisión de un protón a partir de átomos de ^{14}N , transformándose en ^{14}C . Este ^{14}C forma rápidamente CO_2 , y desde la atmósfera ingresa a distintos reservorios de la tierra: la biosfera, la hidrósfera y la litósfera. Cuando estos reservorios dejan de intercambiar ^{14}C con la atmósfera, pierden progresivamente el ^{14}C que contienen, a una tasa de vida media de 5,730 años. Este fenómeno permite usar la cuantificación de ^{14}C para medir el tiempo transcurrido, por ejemplo, desde que un animal murió o desde que un cuerpo de agua dejó de estar en contacto con la atmósfera. Esta técnica es útil para cuantificar el tiempo transcurrido hasta ~40,000 años Antes del Presente (AP), luego de este tiempo una cantidad muy pequeña de ^{14}C permanece en los distintos materiales, el cual no es distinguible del ruido de fondo por las técnicas analíticas actuales. A grandes rasgos, para cuantificar el ^{14}C de una muestra, el carbono que la compone es extraído como CO_2 gaseoso y generalmente transformado en grafito, para finalmente ser analizado por un espectrómetro de masa con acelerador. Hasta hace solo algunos años, una porción muy pequeña de los procedimientos necesarios para la cuantificación de ^{14}C podían ser realizados en Chile. Sin embargo, este escenario está cambiando, en gran parte gracias a nuevo instrumental disponible en Chile el cual ya permite realizar de manera semi automática la extracción de carbono desde matrices orgánicas, sedimentos, colágeno, carbonatos y carbono inorgánico disuelto en el agua, además de su conversión a grafito. La disponibilidad de este instrumental junto con años de experiencia en la aplicación de metodologías de cuantificación de ^{14}C de un grupo de investigadores e investigadoras agrupadas en "Crono Austral", tienen la potencialidad de procesar un amplio rango de muestras ambientales casi íntegramente en Chile. Desde el año 2022, Crono Austral ha probado las metodologías de cuantificación de ^{14}C en materia orgánica, sedimentos y carbonatos en más de 150 muestras problema, 60 blancos, y 120 estándares internacionales, dando resultados exitosos tanto respecto de la precisión de los análisis como de su alcance temporal. En particular, el estándar primario, OX II, correspondiente a ácido oxálico del año 1977, ha sido analizado 25 veces, con un promedio de Fracción moderna (F_m) de $1,34 \pm 0,006$; mientras que el blanco AR2, correspondiente a madera libre de ^{14}C , ha sido analizado 17 veces, con una edad promedio de 47.000 ± 1.490 años ^{14}C AP. Actualmente, nos encontramos testeando metodologías para ampliar el rango de muestras ambientales, en particular para cuantificar el ^{14}C del carbono inorgánico disuelto en agua subterránea, agua de mar, y colágeno, con resultados preliminares exitosos.

Palabras Clave: Geocronología, Radiocarbono, Grafitización.

Medición de isótopos medioambientales en muestras híper salinas de salares

Loreto Isabel Morales Rojas¹, Angelina Bustos Tapia¹, Marco Suárez Fuentes¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Laboratorio, Unidad de Geología Isotópica, TIL TIL 1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

Uno de los desafíos importantes a nivel nacional es el estudio de los salares pre andinos y andinos presentes en el norte de nuestro país, por su potencial de extraer Litio, elemento de gran valor comercial en estos momentos, debido a sus usos en tecnologías energéticas limpias.

Con el objetivo de caracterizar los salares y definir su potencial en el contenido de elementos económicamente relevantes, es necesario integrar una diversidad de análisis de laboratorio tanto químicos como isotópicos. Así, el análisis de muestras híper salinas, como es el caso de las muestras de los proyectos de estudio de Potencial de Litio en salares, representan un desafío para el Laboratorio de Isótopos Estables (IE).

El laboratorio de IE tiene experiencia en análisis de muestras de salares, pero estas no superan el límite de 100 mS/cm conductividad electrónica (CE) límite para el método de equilibrio utilizado para la determinación isotópica de dD y $d^{18}O$ en muestras líquidas. Sin embargo, la composición química de las muestras híper salinas y su alta CE vuelven más complejo el equilibrio gas-líquido lo que contribuye de forma considerable la incertidumbre del método de equilibrio isotópico, lo que nos lleva a iniciar el desarrollo de nueva metodología para el análisis de muestras híper salinas a través de método de pirólisis o una previa destilación antes del análisis para las muestras con CE superior a 100 mS/cm característico de muestras de Salares.

Para el desarrollo de este estudio el Laboratorio de Isótopos Estables de la Unidad de Geología Isotópica del Departamento de Laboratorios del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), está equipado con Espectrómetro de Masas para Razones Isotópicas (IRMS) de flujo continuo marca ISOPRIME 100 y diferentes periféricos para el análisis de las muestras de aguas y de minerales:

- Multiflow (ISOPRIME): unidad automática para equilibrio de gases en agua y carbonatos.
- Analizador Elemental PyroCube (ELEMENTAR) para análisis de muestras sólidas y líquidas: permite la medición de razones isotópicas de carbono, nitrógeno, azufre, deuterio y oxígeno.
- Dual Inlet (ISOPRIME): unidad para análisis de muestras de gases de SO_2 , CO_2 , O_2 , N_2 , H_2 .
- Trace Gas, (ISOPRIME): unidad preconcentradora de gases de N_2O , CH_4 , CO_2 y SO_2 .

Actualmente se realizan análisis de razones isotópicas de dD y $d^{18}O$ en muestras de agua, $d^{13}C$ y $d^{18}O$ en carbonatos y $d^{34}S$ en molécula de sulfato de muestras de agua.

Con fondos obtenidos desde el Ministerio de Ciencias y Tecnología, el Laboratorio de Isótopos Estables tiene como objetivo implementar en Chile la medición isotópica de salmueras provenientes de salares. Fortaleciendo las técnicas analíticas que realiza el Departamento de Laboratorio del Sernageomin ampliando el equipamiento existente e innovando en técnicas analíticas poco desarrolladas en nuestro país.

Palabras Clave: Isótopos, Híper Salinas, Litio, IRMS.

Caracterización de acuíferos de salmuera de litio mediante el uso de registros de resonancia magnética

Claudio Quintavalla¹, Fernando Lourenci¹, Mario Reyes², Francisca Olivares²

(1) Zelandez Services Argentina S.R.L., Argentina

(2) Orica Chile

La identificación y distribución de salmueras, aguas dulces/salobres y sus transiciones es crítica para las etapas exploratorias y de desarrollo de cualquier proyecto de producción de litio. La localización precisa en profundidad, su litología y el entendimiento de las propiedades porales son de suma importancia para determinar las zonas productivas.

El registro de resonancia magnética es utilizado para la caracterización y análisis de acuíferos, lo cual permite a las empresas operadoras de litio optimizar estrategias de perforación y el esquema de terminación de cada pozo y tener un mejor entendimiento del subsuelo.

El principio de medición de la herramienta de resonancia magnética se basa en la aplicación de campos magnéticos permanentes y energía electromagnética a una frecuencia específica. Los núcleos de hidrógeno de la fase fluida son excitados y su respuesta proporciona una medición de la porosidad total y de la distribución del tamaño poral de la roca / sedimento, independiente de la litología. La porosidad total luego es dividida en sus componentes fraccionarios mediante la aplicación de un corte dentro de la distribución del tamaño poral. Esto nos permite obtener los parámetros de retención específica (fluido irreductible y fluido ligado por fuerzas capilares) y rendimiento específico (fluido libre o fluido producible).

Un modelo basado en relaciones matemáticas y físicas entre la porosidad y la permeabilidad es utilizado para calcular una estimación de la permeabilidad y conductividad hidráulica de la formación.

Esta técnica de medición única elimina la necesidad de fuentes radiactivas y es independiente de la litología, por lo que elimina la necesidad del uso de ecuaciones para estimar porosidad, como por ejemplo lo requieren las técnicas basadas en perfiles de densidad, neutrón o acústicos.

El presente trabajo muestra ejemplos del uso de registros de resonancia magnética en pozos ubicados en diferentes salares de la región.

Palabras Clave: porosidad, permeabilidad, resonancia magnética, producción, tamaño poral.

Uso de técnicas de aprendizaje automático para la estimación de la susceptibilidad los efectos de sitio y evaluación cuantitativa de la amenaza sísmica en la cuenca del río Maipo

Esteban Saez¹⁻², Juan Pablo Díaz¹⁻², Mauricio Monsalve¹, Felipe Aron¹, Gabriel Candia¹, Gabriel Armando González López¹⁻³

(1) CIGIDEN, Av Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Av Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

La amplificación sísmica de sitios y los mapas de amenaza sísmica son insumos cruciales para la toma de decisiones y evaluación del riesgo en lugares donde la sismicidad impone un riesgo significativo para la vida humana y la infraestructura. En Chile, uno de los países con mayor actividad sísmica de la Tierra, las técnicas de vanguardia utilizadas para construir mapas de amenaza sísmica se basan principalmente en datos geológicos cualitativos o indirectos, con una consideración limitada de los parámetros dinámicos que dictan la respuesta sísmica del sitio. En este trabajo, proponemos una metodología novedosa para la integración de datos de naturaleza cualitativa y cuantitativa para mapear la susceptibilidad sísmica y la amplificación dinámica mediante aprendizaje automático (AA). Nuestro método utiliza mediciones de velocidades de onda de corte superficial (V_{s30}) y frecuencias predominantes (f_0) en sitios aleatoriamente distribuidos, combinados con mapas de anomalía gravimétrica para actualizar la extensión geográfica de las unidades de amplificación sísmica. Seleccionamos la Cuenca del Río Maipo como nuestra región de prueba para este modelo debido a su importancia estratégica y a la numerosa población e infraestructura crítica expuestas a amenazas sísmicas. La aplicación de este método al caso de estudio resultó en (i) un mapa de susceptibilidad sísmica refinado, y (ii) mapas de V_{s30} y f_0 estimados con gran precisión en el área de estudio. Las mejores predicciones, obtenidas mediante técnicas de AA y validadas mediante validación cruzada, se deben posiblemente a la inclusión de covariantes espaciales en el entrenamiento de los algoritmos, mejorando la capacidad del modelo para capturar las correlaciones espaciales entre datos geológicos, geofísicos y geotécnicos. La estimación de las frecuencias predominantes es considerablemente mejorada al incluir la gravedad como covariante. La precisión de las predicciones de f_0 aparentemente depende más de la elección de las covariantes que del algoritmo utilizado, mientras que las predicciones de V_{s30} son más sensibles al algoritmo escogido. Estos resultados ilustran el gran potencial de los algoritmos predictivos de aprendizaje automático en el mapeo digital de suelos, que superan a las técnicas geoestadísticas tradicionales. Adicionalmente, y usando las mejores predicciones, se generaron mapas de amenaza sísmica para el caso de estudio, a través de un *software* de acceso libre diseñado para generar indicadores de movimiento fuerte para diferentes modelos de sismicidad y ecuaciones de predicción de movimiento de suelo bajo distintos escenarios. La principal contribución de este trabajo es introducir una metodología novedosa de estimación basada en modelos de inteligencia artificial para extender mediciones locales de las propiedades dinámicas de los sitios en un área de interés. Esta información se puede utilizar para estimar cuantitativamente la amenaza sísmica a una escala regional.

Palabras Clave: amplificación sísmica de sitios, aprendizaje automático, amenaza sísmica, geofísica de ondas de superficie, gravimetría.

Financiamiento: Proyecto FONDEF project ID19 | 10021 "Propuesta de guía, elaboración de mapas y plataforma de multiamenazas para toma de decisiones críticas y adaptación al cambio climático de regiones metropolitanas y grandes conurbaciones de Chile" y proyecto FONDAP 1511017 "Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales - CIGIDEN" ambos financiados por ANID.

Referencias:

- Díaz, J.P., Sáez, E., Monsalve, M., Candia, G., Aron, F. & González, G. (2022) "Machine learning techniques for estimating seismic site amplification in the Santiago basin, Chile". *Engineering Geology*, doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106764.

Cuantificación y Caracterización de Pérdida de Circones en la Mesa de Concentración Gravimétrica, para Dataciones U-Pb de Muestras Detríticas

Javiera Salazar Ahumada¹, Marco Suarez Fuentes¹, Angelina Bustos Tapia¹, Paola Martínez Escobar¹, Katja Deckart², Andrew Tomlinson¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Laboratorio, Tiltill 1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

La datación U-Pb en circones detríticos es ampliamente usada en estudios de proveniencia y para determinar edades máximas de deposición, entre otras aplicaciones (Sharman y Malkowski, 2020). Las distintas etapas del proceso que involucra la generación, preservación y selección de circones que serán finalmente medidos por esta técnica presenta varios tipos de sesgos, los que se agrupan en sesgos geológicos y sesgos metodológicos (Dröllner et al., 2021; Chew et al., 2020).

Fedo et al (2003) establece dos estrategias para el estudio de circones detríticos. Una cualitativa, enfocada en que todas las fuentes, es decir, todas las fracciones y poblaciones de circones queden representadas, que puede basarse en una clasificación óptica considerando tamaño, color y morfología. Y una estrategia cuantitativa, donde el objetivo es que la muestra analizada sea representativa de todas las poblaciones de circones presentes en la roca.

La estrategia que ha tomado el laboratorio de SERNAGEOMIN frente a la datación de circones detríticos es principalmente cuantitativa. Esto ha llevado a evaluar los sesgos metodológicos de las distintas etapas y explorar la modificación de la línea de proceso tradicional, minimizando el uso de técnicas que podrían generar la pérdida de alguna población y midiendo una gran cantidad de circones (sobre 80 cristales), para aumentar la probabilidad de medir circones pertenecientes a poblaciones menos representadas. El procedimiento de datación U-Pb en circones en el laboratorio consiste en ocho etapas consecutivas, que incluye: molienda, preconcentración con mesa gravimétrica, separación magnética, decantación con líquidos densos, selección manual de circones o "handpicking", montaje de briquetas, obtención de imagen de cátodo-luminiscencia y, finalmente, medición isotópica por LA-ICP-MS. La mesa gravimétrica, es una de las etapas que ha sido señalada como causante de la pérdida de las fracciones más finas y se ha propuesto incluso evitar su utilización (Slama y Kosler, 2012).

Este trabajo busca evaluar el sesgo en la etapa de preconcentración de circones en la mesa gravimétrica y tiene como objetivo confirmar la hipótesis de pérdida de circones de menor tamaño. Para ello se presentan resultados comparativos de pre concentrados obtenidos con y sin uso de mesa concentradora y la caracterización de las fracciones descartadas en muestras detríticas. Se evalúa la técnica de roleo y cuarteo como método alternativo.

El objetivo final de esta evaluación es determinar el impacto del uso de la mesa en la representatividad del grupo de circones a medir, a fin de tener antecedentes para evaluar su utilización muestra a muestra, en la línea de datación de circones detríticos del Laboratorio de SERNAGEOMIN.

Palabras Clave: Datación U-Pb, circones detríticos, mesa gravimétrica, técnicas analíticas.

Referencias:

- Chew, D., O'Sullivan G., Caracciolo, L., Marck, C. y Tyrrell, S. (2020). Sourcing the sand: accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis. *Earth-Science Reviews* 202, 103093.
- Dröllner, M., Barham, M., Kirkland, CL. y Ware, B. (2021). Every zircon deserves a date: selection bias in detrital geochronology. *Geological Magazine* 158(6), 1135-1142.
- Fedo CM, Sircombe KM y Rainbird RH (2003). Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53, 277-303.
- Sharman, G. y Malkowski, M. (2020). Needles in a haystack: Detrital zircon U-Pb ages and the maximum depositional age of modern global sediment. *Earth-Science Reviews* 203, 103109.
- Slama, J. y Kosler, J. (2012). Effect of sampling and mineral separation on accuracy of detrital zircon studies. *Geochemistry, GEophysics, Geosystems* 13(5).

Intercomparación de análisis químicos y SEM-EDS para muestras de lava

**Marco Antonio Suárez Fuentes¹, Angelina Bustos Tapia¹, Paola Martínez Escobar¹, Javiera Salazar Ahumada¹,
Juan Bustamante Espinoza¹**

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Laboratorios, Til Til 1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

Para la generación de mapas de peligro volcánico, como también para la toma de decisiones ante una emergencia debido a una erupción, es necesario contar con datos analíticos precisos y exactos, y en el caso de emergencias, rápidos. Todo esto con el fin de proveer a las entidades técnicas de información analítica necesaria que permita a las autoridades tomar una decisión informada y ayudar a la población que habita en las cercanías.

Para dar respuesta a esta demanda, el Departamento de Laboratorios del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) cuenta con una amplia gama de técnicas analíticas, tales como, Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Absorción Atómica (EAA), para el estudio de elementos mayores; espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) para elementos trazas y elementos de tierras raras. También contamos con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés "Scanning Electron Microscopy"), que ha experimentado un aumento en la solicitud de requerimientos analíticos para estos fines, debido a las ventajas de los análisis SEM-EDS con respecto a las técnicas químicas usuales, que radican en que es una técnica no destructiva de la muestra, con la cual, es posible visualizar la morfología de la muestra en el caso de cenizas, y en el caso de cortes transparentes es posible ver las asociaciones mineralógicas. Aunque la técnica EDS sólo permite el análisis de elementos mayores (>~1%), los análisis son en un área que va entre los cientos de nanómetros a los pocos micrones, dado por el tamaño de foco del haz de electrones incidente (spot size), es decir, es posible tener microanálisis químicos de un solo mineral y no del total de la roca, como se realiza en las técnicas convencionales de química, ya sea EAA o FRX, que producto de la destrucción de la muestra se pierde la posibilidad de analizar las estructuras internas.

Actualmente no contamos con datos comparativos que relacionen las sensibilidades e incertezas entre las técnicas analíticas SEM-EDS, FRX y EAA, para elementos mayores. Por lo que, esta investigación busca comparar estas tres técnicas en muestras de lavas, del tipo basáltica, andesítica, y diorítica. Como metodología, los resultados de concentración de elementos mayores en roca total obtenidas por FRX y EAA se comparan con los resultados obtenidos por SEM-EDS mediante la integración de datos obtenidos a partir de mapas composicionales en diferentes magnificaciones.

Los resultados son prometedores con el fin de protocolizar los estudios SEM-EDS y así entregar resultados analíticos fiables para el levantamiento de información y posterior toma de decisiones sobre los peligros volcánicos presentes en nuestro territorio.

Palabras Clave: Análisis, Microscopía electrónica, Química, EDS, Intercomparación Analítica.

Financiamiento: Sernageomin.

Agradecimientos: Agradecemos a Felipe Flores y a Franco Vera de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) por facilitar las muestras de estudio.

Resultados de nuevas metodologías de medición $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de muestras jóvenes

Luis Yáñez¹, Paola Martínez Escobar¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Laboratorio, Til til 1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

El Laboratorio de Geocronología de SERNAGEOMIN cuenta con dos equipos para datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Uno de ellos es el espectrómetro MAP-215 que se ha especializado en la datación de rocas antiguas y minerales de alteración ricos en potasio. Este equipo no estaba dedicado a la datación de muestras jóvenes (<1 Ma), ya que, debido a su configuración, y las necesidades diarias del SERNAGEOMIN, raramente lo requerían. Este equipo llegó al laboratorio en 1999, y corresponde a un espectrómetro de masa de sector magnético de 90° , con un radio de curvatura de 15 cm. Está equipado con una copa Faraday y un multiplicador de electrones. En 2018 se reemplazó un nuevo sistema de detección de iones y constantemente se le están haciendo mantenciones que permiten mantenerlo funcionando en buenas condiciones.

En los últimos tres años, las solicitudes de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de rocas menores a 5 Ma hechas al laboratorio han aumentado considerablemente. La mayoría corresponden a rocas volcánicas con erupciones ocurridas hace menos de 1 Ma.

Dado el gran volumen de análisis tanto de clientes internos como externos, el laboratorio se vio en la necesidad de implementar una línea de datación de rocas jóvenes. Para eso, se realizaron cambios en todas las etapas de la línea $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ desde la preparación de la muestra (disminución del tamaño de grano, disminución de horas de 20 a 10 hrs. de irradiación), hasta cambios en la configuración de medición de la muestra en el espectrómetro. Uno de los grandes avances en la datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de rocas jóvenes en SERNAGEOMIN, es el uso de un nuevo estándar de medición: Alder Creek (AC-2). Con una edad de 1,185 Ma, es mucho menor al estándar usado hasta ese momento, Fish Canyon (28.201 Ma). El uso de este nuevo estándar permitió disminuir el error en los análisis.

Por otro lado, el laboratorio de SERNAGEOMIN es uno de los pocos que ocupa un estándar secundario durante la datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. En cada disco con muestras que se envía a irradiar se posicionan los dos estándares antes mencionados. Si la roca es mayor a 1 Ma, se utiliza Fish Canyon como estándar primario para determinar la edad, y Alder Creek como secundario, y viceversa si las rocas son menores a 1 Ma. Este estándar secundario nos sirve para observar la estabilidad del equipo en el tiempo.

Con respecto a la nueva metodología de medición del equipo MAP, esta apunta a una mejora en la limpieza de la línea de extracción de argón, con un análisis inicial con presiones que pasaron de 10^{-8} a 10^{-9} Torr. Además, se implementó una nueva configuración de lectura en el software Mass Spec, agregando mediciones de blanco y aire entre cada paso analizado.

Los resultados obtenidos han sido variados y dependen principalmente de la calidad de la muestra y la relación Ca/K de ésta. Se ha reportado edades con incertezas que van entre 7 y 60%; aquellas con mayor error corresponden a muestras con un mayor contenido de Ca. Se han informado muestras tan jóvenes como 590 ± 40 ka en masa fundamental. En la actualidad se continúa trabajando en procedimientos que permitan disminuir los errores asociados tanto en la preparación de la muestra como en la medición.

Palabras Clave: MAP, Dataciones Radiométricas, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Estándares.

Revolucionando la geofísica: Pusimos los sensores a volar

Lorena Banchemo Salgado¹, Camila Jiménez Vives¹⁻²⁻⁴, Bernardita Jorquera Acuña¹⁻³⁻⁴, Luis Cabrera Mendoza¹

(1) GFDas SpA, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Santiago, Chile

(3) Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

(4) Universidad de Concepción, Concepción, Chile

La magnetometría con drones se ha instalado como una técnica indiscutible en la exploración geofísica, luego de 7 años de implementación continua en Chile. Este desarrollo, que aborda no pocos desafíos técnicos, hoy genera datos magnéticos de sólida calidad, siendo más costo-efectiva y precisa que métodos convencionales de antaño. En esta charla, presentamos una revisión completa de los avances recientes y las aplicaciones más relevantes de la magnetometría con drones en el ámbito geológico.

En primer lugar, discutiremos las ventajas inherentes de utilizar drones en la adquisición de datos magnéticos en comparación con los métodos tradicionales terrestres. Destacaremos la capacidad de los drones para acceder a áreas remotas y de difícil acceso, alcanzar alturas precisas, superar obstáculos topográficos, seguir trayectorias predefinidas para mapear áreas de interés geofísico y obtener una mayor cobertura espacial en tiempos de muestreo reducidos.

A continuación, analizaremos los aspectos técnicos, consideraciones logísticas y desafíos para llevar a cabo una campaña de magnetometría con drones de manera exitosa. Se abordarán temas como la sección y calibración de los sensores magnéticos, la compensación de ruido y la optimización de planificación de vuelo para lograr mejores resultados.

Además, presentaremos una variedad de aplicaciones prácticas en la exploración geofísica, con casos de estudio reales, donde la magnetometría con drones ha demostrado ser altamente efectiva. Estas aplicaciones incluyen la detección y caracterización de yacimientos minerales, la identificación de estructuras geológicas y fallas, la prospección arqueológica, así como el mapeo y monitoreo de objetos metálicos enterrados.

Por último, discutiremos las limitaciones actuales y los desafíos futuros de la magnetometría con drones, como la autonomía de vuelo, la interpretación de datos y la integración con otras técnicas geofísicas complementarias.

En resumen, esta charla proporcionará una visión general exhaustiva de los avances en la magnetometría con drones y su aplicación en la exploración minera. Esperamos que esta revisión sirva como antecedente para investigadores, profesionales y empresas interesados en aprovechar el potencial de esta técnica para mejorar la eficiencia y precisión en la caracterización del subsuelo.

Palabras Clave: Drones, Magnetometría, Exploración minera, Innovación.

Agradecimientos: Agradecemos a Compañía Minera del Pacífico y a Minera Las Cenizas por su colaboración y disposición al darnos acceso a los datos utilizados para respaldar los resultados de esta presentación.

FTG and its Uses in Resource Exploration

George Buzan¹, Colm Murphy¹, Alan Morgan¹, James Brewster¹

(1) Bell Geospace, 400 North Same Houston Parkway East, Suite 325, Houston, Texas 77060, United States

Geoscientists began using gravity gradiometry in the 1910's to explore for oil, gas and minerals. Contrasting densities from different types of rocks in different structural settings change the earth's gravitational field both vertically and laterally. Gravimetry measures the vertical component of the gravity vector and ignores or treats horizontal components as noise. In contrast, gravity gradiometry measures, for all gravity vector components, the change in force with distance. Once the gradients are measured, a simple integration of that information results in the corresponding gravitational field.

Baron Lorand Eotvos introduced the original gravity gradiometer, the torsion balance, in 1902. This invention marked the debut of geophysical instruments in resource exploration, leading to the discovery of an oil field in Czechoslovakia in 1918. Post World War I, the burgeoning oil industry in the United States imported torsion balances to explore the Gulf Coast for salt domes. However, simple gravimeters that measure the vertical component of gravity swiftly replaced the torsion balance due to their efficiency, with an average of 30 station readings per day compared to the 8 provided by the torsion balance gradiometer.

Gradient measurements offer the advantage of eliminating extraneous accelerations. Contemporary gradiometers, such as the Full Tensor Gradiometer (FTG), are usually installed on moving platforms like ships or aircraft. This approach provides more comprehensive information than just the vertical component. The gradient amplitudes typically exceed those of the gravity field, with the horizontal or planar vector components emphasizing geological lineaments and revealing more structural data. They also underscore transitions resulting from rapid lateral density changes.

Gradiometry surveys produce more resolution than gravimetry surveys. Gradiometers can detect smaller wavelengths than gravimeters. A typical airborne survey outputs readings approximately every 60-65 meters along a flight line. A detectability analysis done prior to finalizing acquisition parameters ensures that the flight line interval will be adequate for capturing the expected anomalies. Intervals typically range from 100 m to 2000 m. Tie line intervals typically vary from 1,000 to 10,000 m. Although in areas with a lot of topography, leveling the data can be done without tie lines.

Oil and gas explorationists were the first to use gravity gradiometry. Mineral explorationists have since embraced the technique to identify copper, nickel, gold, kimberlite, and iron ore deposits. Key to success is delineation of both fault/migratory pathways and host geological structure generating sufficient density contrast with surrounding country rock.

An interesting survey over the Bathurst Mining Camp in Canada identified brownfield exploration objectives of interest. DeBeers used the technique to delimit kimberlite deposits in Botswana. Vale used the technique to identify iron ore deposits in Brasil. Copper deposits associated with Very Massive Sulfides are commonly identified by full tensor gravity gradiometry. Hydrothermal lithium deposits can be successfully identified with gravity gradiometry as well.

Palabras Clave: Gravimetry, Gradiometry, minerals.

Full Tensor Gravity Gradiometry in Prospecting for Natural Resources

George Buzan¹, James Brewster¹, Colm Murphy¹, Alan Morgan¹

(1) Bell Geospace, 400 North Same Houston Parkway East, Suite 325, Houston, Texas 77060, United States

History

Geoscientists began using gravity gradiometry in the 1910's to explore for oil, gas, and minerals. The contrasting densities from different types of rocks in different structural settings alter the earth's gravitational field both vertically and laterally. Gravimetry measures the vertical component of the gravity vector and ignores or treats horizontal components as noise. Gravity gradiometry measures the change in force with distance of those vector components.

Baron Lorand Eotvos introduced the original gravity gradiometer, the torsion balance, in 1902. The torsion balance measures only the horizontal gradients of the gravity field. This invention marked the debut of geophysical instruments in resource exploration, leading to the discovery of an oil field in Czechoslovakia in 1918. Post World War I, the burgeoning oil industry in the United States imported torsion balances in 1922 to explore the Gulf Coast for salt domes. Canadian mining companies imported the torsion balance in 1924 and started surveying the Falconbridge area in Sudbury in 1927. Simple gravimeters measuring only the vertical component of gravity swiftly replaced the torsion balance due to their production efficiency, averaging 30 station readings per day compared to the 8 provided by the torsion balance gradiometer.

In the 1980's Bell Aerospace, subsequently purchased by Lockheed Martin, developed the FTG Full Tensor Gravity Gradiometry system. Besides being designed to measure the gradients of all vector components, the system was capable of operating on a moving platform. Lockheed Martin sold the system to the US for use on their nuclear submarines that needed to detect obstructions underwater without revealing their location. The Air-FTG® gradiometry system for use on aircraft evolved from the original FTG system.

Gravimetry

In a Cartesian system the three orthogonal vector components are noted as, G_z , G_x , and G_y ; G_z being the vertical component. Current gravimeters filter out as much of the horizontal components of the vector to get a measure of G_z as accurately as possible. Processing the gravimetry data involves "correcting" the observed data to eliminate the effect of the horizontal components. The predominant correction made to the data is the Terrain Correction.

Gravity Gradiometry

The FTG gradiometer records all the gradient information the gravity vector offers. The tensor produces nine elements, five of which are independent. The five independent elements are T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} , T_{xz} , and T_{yz} . The vertical gradient, T_{zz} should equal the sum of T_{xx} and T_{yy} .

The subscripts indicate the gradient measurement direction. For example, T_{zz} indicates how the vertical gravity component varies in the vertical direction. T_{xy} indicates how the horizontal component in the x direction, G_x , varies in the y direction. The gravity field can be reconstructed by integrating all these independent gradient measurements.

A map of the gradient component T_{zz} produces a map that mimics the map we get from G_z . However, the amplitude of T_{zz} at any one point will be much greater than the amplitude of G_z . So, it's easier to identify anomalies.

The gradient components T_{xx} , T_{yy} and T_{xy} produce curvature maps. Curvature, the inverse of radius, gives greater form to subsurface structure. In addition to structure, these horizontal components sharpen existing lineaments in the data. Finally, components T_{xz} and T_{yz} show how the vertical gravity components vary in the horizontal directions sharply defining the edges of lateral density changes.

Resolution comparison between gravimetry and gradiometry.

Gradiometry detects spatial frequencies twice those of the simple gravity measurement. For example, at a flight altitude of 500 mts the gravimeter can detect wavelengths of 250 mts while the gradiometer can detect wavelengths of 125 mts. Gradiometry amplitudes decrease hyperbolically with depth while gravimetry values decrease linearly. Empirical observations indicate gradiometry will be more useful at distances less than 4000 mts and gravimetry at distances greater than 4,000 mts. Gravimetry and gradiometry acquired at the same time produce a full spectrum gravity product.

Recording gravity along with its gradients also allows the interpolation of data. Nyquist's sampling theory states that the shortest wavelength detectable without aliasing is twice the distance between the samples. The interpolation possible from recording gravity and gradiometry at the same time, detects wavelengths 1.5 times the distance between samples. This ability to interpolate provides flexibility in survey design and operations.

Survey Design

The Geoscientist designs an acquisition survey to detect and image the anomalies expected. The first consideration in design considers the size of the polygon to be acquired. Maximum wavelengths that will be recorded correspond to the length shortest side of the acquisition polygon.

Characteristics of the instrument platform determine in many cases some of the acquisition parameters. Most fixed wing aircraft will not fly slower than 115 knots or lower than 80 mts for safety reasons. This velocity corresponds to a spatial sample rate of approximately 60 mts along a flight line.

Given an inline sample rate, a detectability analysis determines the optimal flight line spacing for the survey. The analysis uses a model of the expected geologic structure with densities. The analysis outputs the line spacing required to adequately image the expected anomaly.

After determining line spacing, the process turns to flight azimuth. Flight line azimuths do not affect the measurement of gravity or gradiometry information. However, if the survey acquires magnetometry data at the same time, the design should ensure that the azimuth optimizes the recording of that data. The optimum flight azimuth for magnetometry runs perpendicular to the dip.

Drape Study/Analysis

A drape study convolves the flight characteristics of the aircraft flying the survey with the topography along the flight lines. Critical flight characteristics include the speed of the aircraft and its climb and descent rates. The study assumes acquisition starts at altitudes of 80 mts over the terrain and then changes as topography dictates. Along with topography, the study will factor in requirements imposed by civil aviation authorities for flying over urban areas or critical infrastructure.

Topography models come from digital terrain models. Common models used include the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) model available from NASA and the WorldDEM model from Airbus.

These terrain models also form the basis of the terrain corrections used in processing the data. Data processors update the models used in the drape analysis with radar altimetry information recorded during the survey. In case of terrain covered with vegetation obscuring the true ground elevation, LiDAR recording ensures an updated terrain model accurate for corrections.

The analysis outputs statistics including minimum flight altitude, maximum flight altitude, and average flight altitude. Outputs also include color contoured maps illustrating the statistics. Using the drape analysis, the geophysicist ratifies the selection of the flight line azimuth or decides on another azimuth that reduces the elevations of the drape statistics. The drape analysis can lead to a decision to include tie lines or not in operations.

Survey Sequence

Contract negotiations finalize the survey design and acquisition timing. Operations consider Safety prior to sending aircraft or personnel to the field. The IAGSA (International Airborne Geophysics Safety Association) codifies the best standards and practices for acquisition. Using those standards, audits of the area to be surveyed locate the nearest airports with proper sources of power for the aircraft and its instruments. Auditors locate suitable lodging for the crew members, local medical facilities and develop emergency medical evacuation procedures.

Safety considerations include a review of the topography of the survey area and the flight platform. Helicopters have problems operating at altitudes higher than 4,000 m. Most fixed wing aircraft safely operate at altitudes up to 7,200 m. Above 4,000 m altitude however, crews operating in aircraft without pressurized cabins will require supplemental oxygen to prevent hypoxia.

Once acquisition begins it continues until all flight lines are recorded. Flight production averages 300-350 km/day or about 10,000 km/month. In the field, the navigation and the GPS units are checked daily. Quality control of the FTG includes summing the principal gradients and visually inspecting the line data. Magnetic data gets checked for spiking events and diurnal variations.

When acquisition finishes, data processing continues and finalizes within 3-4 weeks of acquisition. The FTG data will be leveled, terrain corrected and processed for noise reduction (FTNR) and contact lineaments (CLP). Magnetic data, if recorded, gets leveled and reduced to pole or equator as appropriate.

Interpretation of the processed data may take up to another 5-6 weeks. Data processors analyze the spectral data from the survey and produce a full spectrum gravity product. This full spectrum gravity product combines the higher frequency data from gradiometry and the lower frequency data from gravimetry. More detailed lineament mapping will be performed as well. If magnetics are acquired, lineaments from it will be produced. Then the gradiometry lineaments and magnetic lineaments will be compared.

Output/deliverables from Gradiometry Surveys

Typical outputs from a gradiometry survey include the following:

- Gridded Frequency filtered data capturing causative signal from each FTG Tensor component.
- Computed Invariant Responses including cubed root of the rotational Invariant Tensor and Amplitude of Lineament Edges from FTG data.
- Lineament Maps from FTG.
- GeoTIFF format images of all FTG and processed data and interpretative products
- GeoTIFF format image of final flightpath, altitude, terrain, and planned drapesurfaces

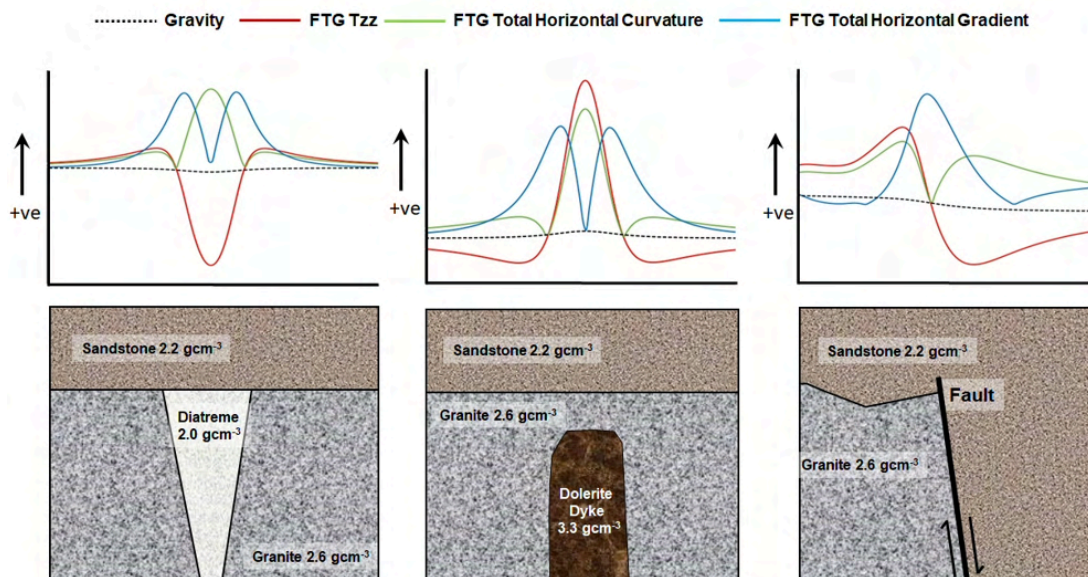
Bathurst Mining Camp Study

An interesting survey that demonstrates the utility of acquiring FTG data was acquired over the Bathurst Mining Camp (BMC). Iron mining began in the BMC in the early years of the 20th century. Activity was suspended and didn't resume until the 1960's when zinc mining began. Presently, Zinc, Lead, Silver, Copper, and Gold are all mined from numerous known VMS (volcanogenic massive sulfide) deposits. Geological and geophysical surveys detailed prospects in the 1950's prior to resuming mining in the 1960's.

Existing information includes TMI Magnetics, EM Apparent Conductivity, and ground gravity surveys. The NRCAN (Natural Resources Canada) makes all that data available to users.

In 2004, Bell Geospace flew an FTG survey over a portion of the BMC. The survey covered approximately 3100 sq.km. with a 200 mt flight line spacing. As expected, the FTG data shows increased sensitivity to geology when compared to the ground gravity data. Amplitudes of data are greater, and shapes and edges of the anomalies stand out and are better defined. Differencing the ground gravity information from the FTG generated gravity field, shows areas where FTG contributes information not available from the land gravity.

Curvature maps of the FTG data show correlations between structures and primary mineral deposits. The maps also identify structural zonation in the survey as well as potential new drill targets.



Summary

FTG (Full Tensor Gravity Gradiometry) provides a versatile high-resolution tool useful for many applications. The Bathurst Mining Camp Survey serves as an example of its utility in mineral prospecting. Oil and Gas exploration, detection of shall hazards to drilling and the delimitation of geothermal deposits find FTG useful.

FTG does not only detect anomalies from density contrasts, it increases the resolution with higher frequencies, and highlights them with higher amplitudes. FTG shapes the anomalies through curvature analysis and highlights the edges between geologic entities.

Keywords: gradiometry, gravity, prospecting, minerals, geophysics.

References:

- Brewster, J., 2016. "Reducing Noise By Transforming and Combining Gravity Gradient Components. in ASEG workshop "Advances since 2010 in Airborne Gravity Gradiometry and Airborne Gravity".
- Brewster, J., Mataragio, J., and Murphy, C., 2014. A self steering directional filter for focused imaging of full tensor gradiometer data' In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, pp. 1334-1338. Society of Exploration Geophysicists.
- Brewster, J., 2011. 'Description and evaluation of a full tensor interpolation method. In 2011 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Eckhardt, E.A., 1940. A Brief History of the Gravity Method of Prospecting for Oil, Geophysics, Vol.5. Issue 3, p.231.
- Jekeli, C., 2016. Airborne Gravimetry for Geodesy (2016, May 23) https://www.ngs.noaa.gov/GRAV-D/2016SummerSchool/presentations/day-1/2Jekeli_Theoretical_Fundamentals.pdf.
- Miller, A.H., 1934. The Theory and Operation of the Eotvos Torsion Balance, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Vol. XXVIII, No. 1, pgs. 1-31.
- Morgan, A, Brewster J., Paddock, D., Sudhakar, V., Fang, J.J., 2020. 'Identification and assessment of depressions within the Ochoan evaporites through the integrated interpretation of 3D seismic and full tensor gravity gradiometry in the Delaware Basin of Texas' SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 1925-1929. Society of Exploration Geophysicists, 2020.

Optimización de ley de cobre por selectividad de mineral mediante tecnología de rayos X

Alberto Herrera Casale², Alejandro Sanhueza Passache¹, Julietta Zamora Tapia²

(1) Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM, SI Recursos Minerales, Vicepresidencia Desarrollo y Sustentabilidad, Baquedano 902, Iquique, Chile

(2) Universidad del Desarrollo, Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Plaza 680, Las Condes., Santiago, Chile

Introducción

En la gran minería a rajo abierto existen sesgos en el modelo geológico de corto plazo debido a la falta de información obtenida mediante el mapeo de pozos de tronadura y el proceso de corte de malla.

La optimización de la ley de alimentación a planta en la industria minera es crucial para mejorar la eficiencia en la recuperación de mineral y reducir los costos de producción. En este contexto, la minera Collahuasi ha implementado una nueva metodología para mejorar la selectividad del mineral mediante el uso de una tecnología que incluye un sistema de rayos X (XRF) que analiza elementos en tiempo real montado en el balde de una pala de carguío.

En este trabajo se busca cuantificar los beneficios obtenidos al implementar la tecnología descrita, en una operación minera a rajo abierto en cuanto a reconciliación, selectividad de mineral y confianza operacional de la tecnología.

Metodología

La metodología efectuada para la realización de este estudio fue la recopilación de base de datos histórica de pozos de tronadura, lecturas de rayos (FRX) por el período desde agosto de 2022 a abril de 2023, base de datos de corte de malla y despacho de asignación de camiones en el mismo período de tiempo. En base a esto se realizaron correlaciones espaciales de los datos, análisis estadísticos y cálculos de cobre fino (Tabla 1).

Tabla 1 Lecturas FRX v/s Pozo de Tronadura más cercano en un radio de 10 metros.

El estudio está basado en un caso real de aplicación de esta tecnología, la cual fue implementada en la pala 12 asignada a la fase 14 del rajo Rosario en bancos en material estéril, y que ha estado operando en este sector del rajo desde agosto de 2022 (Figura 1).

Figura 1 Comparación Espacial Lecturas FRX ($\geq 0,3\%$ CuT) y Pozos de Tronadura ($< 0,3\%$ CuT).

La implementación consiste en 3 sensores FRX y un distanciómetro láser montados en el equipo de carguío, realizando mediciones en tiempo real que entregan tres valores de la ley de cobre. Además, considerando que cada camión necesita tres baldes para su llenado, la ley de cobre final asignada corresponde al promedio de nueve valores en total, de modo de incrementar la robustez del valor de ley de cobre asignada.

Resultados y Conclusiones

Se ha observado buena operabilidad del sistema debido a que ha estado disponible al 100% desde su implementación. La tecnología permitió un aumento en el tonelaje de mineral identificado en bancos de estéril, permitiendo seleccionar mineralizaciones de poca potencia diseminadas en grandes volúmenes de estéril, que antes se veían afectadas por dilución.

En promedio se han podido recuperar 60.000 toneladas por cada veta de alta ley, ubicadas en un banco de estéril. Como referencia en fase 14 se encuentran 5 vetas por banco. En general, la implementación de la tecnología ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la selectividad de la alimentación a planta.

Se recomienda un futuro plan de implementación de la tecnología en bancos de mineral, para mejorar la selectividad de minerales de mayor ley de cobre presentes en vetas de baja potencia, que están rodeadas de mineralizaciones con leyes de cobre más bajas. Esto además permitirá cuantificar de forma más precisa las mejoras en reconciliación de datos para la planta.

Palabras Clave: Selectividad de mineral, Tecnología de Rayos X, Ley de Cobre, FRX.

Financiamiento: El financiamiento de este trabajo se realizó por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM para realización de un Informe Interno de la Implementación del producto acorde a su productividad.

Agradecimientos: Agradezco a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM, Alejandro Sanhueza, Rodrigo Silva y Julietta Zamora por su invaluable apoyo en esta memoria.

Passive seismic tomography for mineral exploration: a non-invasive and cheap imaging method

Anais Lavoue¹, Dan Dan Hollis¹, Nick Arndt¹, Sophie Beauprêtre¹, Aurélien Mordret¹

(1) SISPROBE

In a Worldwide context where the ecological transition will mainly go through a growing demand in raw materials, the mineral industry needs to extend its exploration towards not explored deeper or more remote areas. To this aim, passive seismic tomography can be used for any exploration depth, and from regional to deposit scale. It also completes the physical characterization of the subsurface provided by MT and gravity surveys, improving the understanding of the target zones.

Recent development of autonomous seismic recorders ("nodes") allows for reliable continuous recording of seismic data for weeks at a time. Autonomous nodes greatly increase the flexibility of seismic survey design and, most importantly, permit low-cost collection of dense passive seismic data with minimal impact on the local environment.

The passive seismic technique uses ambient seismic noise from natural and anthropogenic sources for subsurface imaging and monitoring. Cross-correlation between receiver pairs is used to extract the Green's function (e.g., Bensen et al., 2007, Lecocq et al., 2014), and analysis of dispersion of surface wave from the cross-correlated data generates a near-surface 3D velocity model of S-waves (Mordret et al., 2013, Boué et al., 2016, Shapiro et al. 2004). This model is then used to establish the structure, lithology and physical characteristics of materials in the sub-surface.

Passive seismic tomography has been used for mineral exploration for more than 5 years and is becoming systematic in the exploration toolbox of the biggest mineral exploration companies. Here we present a few applications of our method applied to the mining industry at different scales. Three examples of mineral exploration are presented and are ground-truthed using borehole information or other geophysical results. All three examples are sorted by scale, from regional to deposit.

Although this abstract presents mineral exploration applications, passive seismic tomography can also be used for geothermal exploration or for characterizing the sub-surface for geotechnical applications. It is also becoming popular for tailings dams and pit landslide monitoring.

Keywords: passive seismic, mineral exploration, tomography, 3D Vs model.

High-resolution visualization of the deep-seated structures beneath a porphyry copper system in northern Chile using local earthquake tomography

Gisella Palma¹⁻², Diana Comte²⁻³, Jimena Vargas⁴, Daniela Calle-Gardella², Matias Peña¹⁻², Sergio García-Fierro¹, Joelle D'Andres⁵, Steven Roecker⁶, Sergio Pichott⁴

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(4) CODELCO, Gerencia de Exploraciones, Casa Matriz, Santiago, Chile

(5) Australian National University, Research School of Earth Sciences, Canberra, Australia

(6) Rensselaer Polytechnic Institute, Earth and Environmental Sciences, School of Science, Troy, USA

Porphyry copper (porphyry) deposits are the most important source of Cu, Mo, and Re worldwide, a significant source of Au and Ag, and might provide significant amounts of critical metals such as platinum group elements, rare earth elements, In, Co, Se, and Te. Despite their importance for the global supply of a range of metals, the rate of discovery of porphyry deposits has steadily decreased in the past decades, since large, shallow, and high-grade deposits have been mostly found and exploited. Brownfield and greenfield discoveries of new orebodies are therefore shifting to a greater depth. Exploring deeper orebodies (> 2 km deep) comes with the challenge of identifying the weak “footprints” of deep-seated porphyry deposits and the need for new, effective, and unconventional exploration methods.

World-class porphyry deposits form mainly along magmatic arcs, above active subduction zones, where they are closely associated with shallow-level intrusive rocks. These ore systems arise from hydrous and oxidized basaltic arc magmas generated in the mantle wedge following the release of fluids and/or hydrous melt from the subducting slab. These basaltic melts differentiate in multi-depth magma reservoirs in the mid-to-lower crust and ascend to the upper crust where they further evolve in large magma chambers, eventually giving rise to evolved, fluid-saturated melts which intrude the shallow crust as plug-like intrusions. Copper-rich mineralizing fluids are exsolved from these shallow intrusions and released into the surrounding host rock where precipitates as Cu-sulfides.

Local earthquake tomography (LET) is a passive geophysical method that can reveal the architecture of the Earth's interior through images of seismic wave speeds. This technique uses observations of arrival times from compressional (P) and shear (S) waves produced by earthquakes and is therefore mostly applied to study the subsurface of seismically active areas, e.g., subduction zones. In recent years, the seismic velocity structure of the mantle and crust, and in particular the ratio of P and S wave velocities (V_p/V_s), has been shown to be a powerful tool for identifying melt-bearing regions and fluid pathways below active volcanoes and subduction zones. Few studies have also shown a relationship between low V_p/V_s ratios and the location of large porphyry Cu-(Mo-Au) and iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits in Chile, Australia, Russia, and China.

Our study area covers ~ 15,000 km² between 19.2°S and 20.3°S in northern Chile and runs along the Paleocene to Early Eocene and Late Eocene to Early Oligocene copper belts. Cerro Colorado is the largest porphyry deposit with an active mine site in the area, which includes several smaller porphyry prospects such as Mocha, Sagasca, Queen Elizabeth, and Yabricoya. The area is dominated by gravel deposits to the West, covering the sub planar Pampa del Tamarugal, and by volcanic rocks to the east along the Western Cordillera. The main structures are northwest-trending faults that depart from the generally north-south oriented faults associated with the Domeyko Fault System.

In this study, we construct a 3D V_p/V_s model beneath the study area by using LET. We also evaluate the use of LET as a tool for imaging deep-seated structures, fluids/melt pathways and reservoirs, hydrothermally altered zones, and orebodies. The seismic database stores 204,943 P and S wave arrival times recorded by 51 seismic stations between October 9, 2018, and June 28, 2019. Our images show that low V_p/V_s ~ 1.55–1.65 anomalies (i.e., high-rigidity rocks) extending to ~ 5–15 km depth coincide with the surface expression of known porphyry deposits and prospects, as well as delimit structures that host orebodies and related hydrothermal alteration zones. Medium V_p/V_s ~ 1.68–1.74 and high V_p/V_s ~ 1.85 bodies correspond to intermediate-felsic plutonic precursors for porphyry intrusions and mafic magma reservoirs that underlie shallower orebodies, respectively. Imaging these precursors and parental plutons is crucial to the identification of orebodies, as they act as the source of ore-forming fluids.

Our case study shows that local earthquake tomography — not traditionally implemented in mineral exploration — combined with well-established geological models can provide good indicators of the regional scale structures that host porphyry deposits. Additionally, our V_p/V_s 3D model strongly supports the notion that crustal architecture, particularly pop-up geometries, acts as a first-order control on the location of many porphyry deposits. We propose that LET could become an invaluable asset for the modern exploration of deep exploration targets with minimal environmental impact.

Keywords: geophysical imaging methods, local earthquake tomography, porphyry copper deposits, deep exploration targets, three-dimensional model.

Financing: This research was funded by the National Agency for Research and Development of Chile (ANID) by Project AFB180004, Project AFB220002 and by the FONDEF ID21I10022 project.

References:

- Comte, D., Palma, G., Vargas, J. et al. (2023) Imaging the subsurface architecture in porphyry copper deposits using local earthquake tomography. Scientific Reports 13, 6812. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33820-w>.

Estudio aéreo del campo natural electromagnético para la exploración de sistemas de mineralización en pórfidos y epitermales

Alexander Prikhodko¹, Andrei Bagrianski¹, María José Segovia Baldovino¹

(1) Expert Geophysics Limited, Geophysical, 3-4, 16 Mary St., Aurora, Canada

Los métodos geofísicos de resistividad eléctrica son una parte importante de la geofísica aplicada en la exploración de sistemas de mineralización en pórfidos y epitermales relacionados. El electromagnetismo aéreo es capaz de mapear la estructura de resistividad eléctrica del subsuelo de grandes áreas y de difícil acceso en tiempos razonables. Los distintos sistemas y principios del EM aéreo tienen capacidades y limitaciones diferentes, y, en consecuencia, distinto rango de aplicabilidad. La tecnología MobileMT, es un sistema de electromagnetismo aéreo que mide el campo natural electromagnético terrestre, con el cual se pueden alcanzar profundidades de hasta 2.5 km, superando significativamente cualquier sistema EM aéreo de fuente activa en cualquier condición geoelectrónica. Gracias a las soluciones técnicas introducidas en la tecnología MobileMT, esta es sensible a las variaciones de resistividad en un amplio rango y límites geoelectrónicos en todas las direcciones. Las características de detectabilidad de la tecnología MobileMT la hacen especialmente útil para estudiar sistemas minerales de pórfidos y epitermales con amplia variabilidad morfológica y petrofísica.

No existe un modelo geofísico unificador y común para los sistemas de pórfidos y epitermales. Diferente litología y composición de la roca caja, la extensión y grado de los procesos específicos de alteración y desarrollo de sistemas de fallas y fracturas, las infiltraciones, los acontecimientos tectónicos, el nivel de erosión actual, son algunos de los factores que afectan el patrón de resistividad de los depósitos pórfidos.

Investigamos varios modelos de pórfidos y epitermales conocidos con patrones geoelectrónicos diferentes. Se calculó la respuesta del campo electromagnético natural a partir de modelos, seguido por la estimación de la estructura objetivo. El resultado de la investigación de las pruebas sintéticas demuestra que la tecnología MobileMT tiene la capacidad de detectar sistemas minerales pórfidos y epitermales, incluyendo los que se encuentran profundamente localizados o enmascarados por una cobertura conductiva post-mineral.

Los ejemplos de campo a partir de diferentes entornos geológicos con estilos de mineralización pórfido/epitermal conocido, demuestran la efectividad del mapeo de la estructura de resistividad eléctrica con el sistema MobileMT. Los datos de campo proporcionan los patrones característicos de los sistemas de pórfidos y epitermales que se analizan en relación con los modelos geológicos conceptuales.

Palabras Clave: electromagnetismo, geofísica aérea, pórfido, epitermal.

AMSA Encuentro: una revisión de los modelos IP 3D y CSEM-MT. Nuevas herramientas para el reproceso de datos geofísicos históricos

Héctor Verdejo¹, Leonardo Torres², Terry Ritchie³, Peter Rowston³

¹ Servicios y Recursos Geofísicos, GRS Chile LTDA

² Antofagasta Minerals S.A

³ Geophysical Resources & Services, GRS Australia PTY

Encuentro, originalmente llamado Caracoles, es un pórfido Cu-Au-Mo descubierto en la región de Antofagasta a 72 km al suroeste de Calama y que se emplaza en la franja del Eoceno – Oligoceno temprano. Esta franja es conocida por ser una de las más prolíficas del mundo en el contenido de cobre y extiende sus márgenes desde el sur de Perú 18° S hasta los 31° S en Chile [1].

El descubrimiento de Encuentro fue realizado el año 2007 como resultado de una ambiciosa campaña de exploración emprendida por Antofagasta Minerals (AMSA) y motivada por descubrimientos previos en el distrito centinela [2], que incluyó un acucioso trabajo de geología, análisis estructural del área, re-mapeo de sondajes históricos, y la realización e interpretación de perfiles geofísicos de IP profundo MIMDAS.

Encuentro está ubicada bajo una cubierta de gravas terciarias post-minerales de entre 100 - 130 m de espesor bajo la cual se emplazan un conjunto de diques de pórfido dacítico que intruyen una secuencia volcanosedimentaria [2].

La revisión de información geológica histórica y la utilización de los métodos geofísicos adecuados permitió definir muy certeramente blancos de exploración en esta zona cubierta.

En particular, en los perfiles 2D donde la cargabilidad mostraba una respuesta favorable. La anomalía de cargabilidad de la línea 7.448.000.N (2007) fue muestreada con el sondaje JVC-28 que interceptó el halo pirítico del sistema y mineralización débil de calcosina supérgena a 300 m de profundidad [2].

En este trabajo revisaremos los nuevos modelos de resistividad y cargabilidad 3D obtenidos con E4D y el modelo IP para la línea 7.448.000.N a partir de datos CSEM+MT, obtenidos con MARE2DEM [4]. Para esto utilizaremos la información histórica de datos de las campañas de exploración de los años 2007 y 2008.

E4D es un software de inversión de datos de resistividad y cargabilidad de última generación que permite modelar los datos en una grilla tetraédrica no estructurada y que comúnmente logra definir de mejor manera las anomalías [3]. MARE2DEM es un modelo de inversión 2.5D que permite realizar inversiones combinadas de datos MT y CSEM y obtener un modelo de cargabilidad desde este conjunto de datos.

Conclusiones

En los resultados obtenidos en la inversión 3D vemos que el modelo de cargabilidad E4D 3D logra resolver de forma satisfactoria la extensión de la anomalía IP y muestra una buena correlación con las unidades que controlan la mineralización.

Los resultados de los sondajes utilizados en este estudio muestran que, en el núcleo cargable del modelo 3D, existe una respuesta mixta con sulfuros económicos y no económicos que dan origen a la anomalía IP. También se observa que el modelo de cargabilidad 3D logra representar de manera favorable la extensión del halo pirítico del sistema.

El modelo de cargabilidad CSEM+MT obtenido en la línea 7.448.00.0N guarda una estrecha relación con la sección de litología de la línea y también con la distribución de sulfuros en los datos revisados.

Agradecimientos: GRS Chile quiere expresar su más profundo agradecimiento a AMSA por conceder los permisos para la publicación de este trabajo y por su colaboración en proporcionar la información geológica en que se sustenta.

Referencias:

- [1] Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. The Geology of Chile. The Geological Society, ch 6.
- [2] Swaneck, T., Mora, R., Martínez E. (2009) Caracoles: Un Nuevo Pórfido de Cu-Au-Mo en el Distrito Centinela. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago.
- [3] Johnson, TC, RJ Versteeg, A Ward, FD Day-Lewis & A Revil (2010). Improved hydrogeophysical characterization and monitoring through parallel modeling and inversion of time-domain resistivity and induced-polarization data. Geophysics, 75(4).
- [4] Key, K. (2016), MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. Geophysical Journal International, 207(1), 571–588. DOI: [10.1093/gji/ggw290](https://doi.org/10.1093/gji/ggw290).

Análisis de datos estructurales en imágenes y modelos de alta resolución mediante el uso de Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)

Sebastián Espinoza Guzmán¹, Renato Cisternas Saldívar¹, Christopher López Aguilera¹

(1) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Avenida Angamos, 0610 Antofagasta, Chile

El uso de nuevas tecnologías en diversas disciplinas de la Geología ha facilitado la toma de datos e información de terreno, posibilitando mejores análisis e interpretaciones. Por ejemplo, el uso de *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)* o drones se ha convertido en una gran herramienta para generar levantamientos topográficos, mapas, modelos 3D de alta resolución, entre otros. Por lo general, los drones utilizados corresponden a la gama media de drones comerciales (*DJI Mini 2*, *DJI Air 2S* y *AUTEL Evo II Pro*); siendo un desafío obtener resultados de alta calidad y a un bajo costo. Esto último, va de la mano con la planificación de cada vuelo y su adecuado procesamiento digital. En este contexto, la implementación de estas nuevas metodologías abre una amplia ventana para la obtención y análisis de datos estructurales, tales como, levantamientos de estructuras sobre afloramientos de escala kilométrica y/o centimétrica. Esto, además, facilita la exploración de sectores de difícil acceso, pudiendo reconstruir imágenes con mayor calidad y de manera realista de la superficie. Gracias al uso de *RPAS* se ha podido generar nubes de puntos, imágenes DEM y ortomosaicos, de resoluciones centimétricas, posibilitando la identificación de lineamientos menores y sutiles variaciones en el relieve, imperceptibles en imágenes satelitales de uso abierto. Aprovechando el potencial morfoestructural del Desierto de Atacama, en la Región de Antofagasta, en este trabajo presentamos resultados a partir de la obtención de imágenes de alta resolución con distintos equipos *RPAS*. Estos resultados registran imágenes que se caracterizan por exponer extensas superficies de erosión (Depresión Central), que ocultan estructuras no reconocidas directamente en terreno o áreas con afloramientos intensamente deformados (borde oriental de la Cordillera de Domeyko). La obtención de estas imágenes puede complementarse o contrastarse con el uso de sensores *LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)* de bajo costo, como los que se pueden encontrar en dispositivos móviles (e.g., *iPhone 13 Pro*), consiguiendo detalles milimétricos de los afloramientos. La obtención de este tipo de imágenes puede generar bases de datos que permiten analizar e interpretar procesos de deformación, mediante el postprocesado de imágenes, proyectar estructuras bajo cobertura, o correlacionar con otras técnicas de geofísica de subsuelo. Finalmente, un objetivo paralelo a la aplicación de esta metodología, a ser considerado, es el uso e implementación en docencia. Esta técnica representa una forma gráfica y realista de analizar terrenos o paisajes deformados. Así, la obtención de datos de manera remota puede entregar mejores evidencias de estructuras de distintas escalas e indicadores de complejos procesos de deformación.

Palabras Clave: RPAS, fotogrametría, teledetección, modelado 3D, geología estructural.

BOOM! Tephrochronological dataset and exploration tool of the Southern (33–46° S) and Austral (49–55° S) Volcanic Zones of the Andes

Consuelo Martínez Fontaine¹⁻², Vanessa Peña-Araya³, Chiara Marmo¹, Marine Le Morvan⁵, Guillaume Delpech¹, Karen Fontijn⁴, Giuseppe Siani¹, Lucile Cosyn-Wexsteen¹

(1) Université Paris-Saclay, Géosciences Paris Saclay (GEOPS), Orsay, France

(2) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Laboratoire mixte CNRS-CEA, Gif-sur-Yvette, France

(3) Université Paris-Saclay, Inria, Orsay, France

(4) Université Libre de Bruxelles, Département Géosciences, Environnement et Société, Bruxelles, Belgique

(5) Inria Saclay – Île-de-France, Palaiseau, France

Tephrochronology is the discipline of geosciences which uses the deposits of explosive volcanic eruptions as stratigraphic and chronological markers. These deposits are called tephra, and by studying them, researchers can reconstruct the eruptive history of volcanic centers: how often volcanic activity occurs, the magnitude of the eruptions, and the dispersion of the volcanic products. The Southern (SVZ, 33–46° S) and Austral (AVZ, 49–55° S) Volcanic Zones of the Andes are two very active volcanic zones where tephrochronology is of great use to improve chronologies of paleoenvironmental records in Patagonia, an area providing unique records at global scale; as well as to identify areas likely to be affected by volcanic eruptions in the future, essential for producing volcanic hazard maps. In these zones, the close proximity of many volcanic centers with recurrent explosive activity, which have very similar geochemical compositions, and very often poor age constraints of volcanic deposits, represent a challenge for the study of tephrochronology. In addition to this, the ever-growing amount of tephrochronological information in the area, dispersed in different types of publications which additionally vary greatly in format, makes the integration of the data produced by different researchers, and consecutively its interpretation, increasingly harder. Here we address this issue by compiling the **BOOM! dataset**, which integrates ~30 years of research on 32 active volcanic centers and 132 different eruptions which took place during the last 20,000 years. In order to increase the findability and reusability of the large dataset, we developed an **online platform** which provides user-friendly tools for exploring it, and helps users download subsets of it. Both the dataset structure and the explorer were developed with continuous feedback of researchers in tephrochronology and practitioners from the National Volcanic Vigilance Network of the Chilean Geology and Mining agency SERNAGEOMIN. The dataset is composed by ~17,000 sample observations, each described by 80 attributes, which contain information on the geochemical composition, geochronology and physical characteristics of volcanic products, along with metadata. In order to integrate this very heterogeneous information, special attention was given to include information which allows users to evaluate data quality and comparability, as well as to provide tools in the explorer for users to filter data by different criteria. The integration of this dataset opens new perspectives for the development of novel visualizations of tephrochronological data, for example, to better represent the uncertainty of data and its interpretation, which we at the moment explore together with Information Visualization researchers. Finally, in order for these kinds of initiatives to live in time it is necessary that institutions with stable funding can maintain the dataset and explorer and updated them as new information and technologies are available. Considering the latter, the BOOM! dataset and explorer are currently being transferred to the National Volcanic Vigilance Network of the Chilean Geology and Mining agency.

Keywords: Tephrochronology, Dataset, Explorer, FAIR Data.

Mapeo Geomorfológico a través de Segmentación de Imagen y Clasificación Supervisada en la Región De Margaritifer Sinus, Planeta Marte

Savka Andrea Meza Díaz¹, José Lattus Sanhueza¹

(1) Universidad Santo Tomás, Geología, Ingeniería, Av. Ejército 146, Santiago, Chile

Estudiar la superficie en el planeta Tierra ya sea mediante análisis en terreno y/o imágenes satelitales ópticas, puede resultar complejo debido a factores como la presencia de vegetación, áreas pobladas, vías de acceso y las amplias masas de agua que este presenta. Por otra parte, una superficie a gran escala y completamente expuesta es lo que entrega el planeta Marte, favoreciendo este tipo de análisis, y junto este, los Modelos Digitales de Elevación (DEM), debido a que trabajan mediante valores de altura respecto al nivel medio del mar, dando como resultado una imagen de relieve.

La Segmentación de Imagen es una metodología que divide las imágenes mediante la agrupación de píxeles, siendo mucho más precisa a diferencia de otras metodologías que presentan errores de píxel, pero ¿podría incidir en la clasificación y definición de elementos geomorfológicos en el planeta Marte mediante Modelos Digitales de Elevación? Para comprobar esto, se propone una metodología de análisis geomorfológico en base a DEM, mediante la Segmentación de Imagen y Clasificación Supervisada aplicado a ambientes fluviales en la región de Margaritifer Sinus del Planeta Marte.

Para el desarrollo de esta investigación se escogieron dos imágenes denominadas como B05 y D20, las cuales presentan morfologías de redes que pudieron haberse formado por flujos de agua en el pasado, mientras que el procesamiento de Modelos Digitales se llevó a cabo utilizando la Segmentación de Imagen mediante el *software* ENVI y posteriormente se utilizó el *software* QGIS para la creación de drenajes y áreas de influencias, dando como resultado zonas de llanuras aluviales como unidad principal de estudio, posteriormente mediante la misma segmentación se procedió a clasificar elementos secundarios, entregando como resultado cráteres de diversos tamaños, montañas y el suelo correspondiente a la superficie marciana.

El tamaño de los segmentos es un factor importante al momento de querer caracterizar la geomorfología, si estos tienen tamaños grandes, se logra modelar la morfología de los DEM, pero al momento de unir la segmentación junto a las áreas de influencias no se logra detallar completamente las zonas de llanuras aluviales, quedando espacios vacíos o sin unir, en cambio, pequeños segmentos unidos entre sí entregan una imagen cubierta homogéneamente y al juntarla con los vectores mencionados anteriormente, se definen las unidades aluviales detalladamente.

También un factor importante son los algoritmos *Edge* e *Intensity*, este último entrega bordes irregulares donde posteriormente se deben procesar para mejorarlos, mientras que el primero entrega bordes regulares de las zonas de estudios, sin necesidad de utilizar herramientas de suavizado.

Para que esta metodología logre caracterizar elementos geomorfológicos, es imprescindible que los segmentos presenten grandes cantidades de píxeles, de pequeños tamaños y unidos entre sí, de esta manera cubren homogéneamente la imagen entregando un mayor detalle y definición en la morfología tras su procesamiento. Respecto a la clasificación geomorfológica de llanuras aluviales, el ajuste de segmentación debe utilizar el algoritmo *Edge*, debido a que este se encarga de suavizar los bordes de las llanuras de manera semi automática.

Palabras Clave: Marte, Segmentación de Imagen, Modelos Digitales de Elevación, Llanuras Aluviales, Cráteres.

Financiamiento: Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Ejército 146, Santiago, Chile.

Herramienta geoespacial para la priorización de infraestructura afectada por incendios forestales aplicada a eventos ocurridos en febrero 2023 en las regiones Ñuble, Biobío y La Araucanía, Chile

Paola Peña¹, Tania Ocampo¹, Paula Olea-Encina¹, Paula Garate¹, Silvia Arce¹, Hugo Neira¹

(1) SERNAGEOMIN, Geomática

Los incendios forestales han aumentado de frecuencia e intensidad durante las últimas décadas siendo el cambio climático uno de los factores principales que contribuyen a esta situación. Durante el verano del 2023 se desarrollaron múltiples focos de incendios forestales afectando 357.826,5 Ha (CONAF, 2023) en las regiones de Ñuble, Biobío y La Araucanía. Esta gran extensión dificulta la evaluación de infraestructura crítica a nivel nacional, en este caso, viviendas y captaciones de agua potable rural (APR), por tanto, es necesario buscar formas de optimizar la asignación de recursos para hacer frente a esta emergencia y asegurar una respuesta efectiva. La geomática es una disciplina eficiente para el análisis territorial a diferentes escalas, en este caso permite priorizar la infraestructura crítica en zonas susceptibles a remociones en masa afectadas por los incendios forestales.

Se ha desarrollado una herramienta geoespacial utilizando el software ArcGIS Pro, que considera parámetros morfométricos para una evaluación preliminar, eficiente y automatizada de la susceptibilidad de deslizamientos y de flujos que puede abarcar grandes extensiones del territorio. Esta herramienta se basa en una metodología simplificada que permite priorizar zonas para que luego sean visitadas en terreno, favoreciendo la Respuesta en la Gestión de Riesgo y Desastre (GRD).

La evaluación de susceptibilidad de deslizamiento consiste en una evaluación multicriterio basado en un proceso de análisis jerárquico (Saaty, 1980) de los principales parámetros morfométricos. Por otro lado, la evaluación de susceptibilidad de flujos se fundamenta en el análisis de la red de drenaje. Ambos procesos fueron elaborados utilizando el modelo digital de elevación ALOS PALSAR de tamaño de píxel 12,5 m. Los resultados obtenidos de ambos análisis se combinan mediante una reclasificación utilizando álgebra de bandas, seleccionando la condición más desfavorable entre ambos procesos para cada píxel. Posteriormente, se realiza un análisis de estadística zonal para la priorización de la infraestructura crítica. Este análisis se realiza por cada elemento considerado, y se establece un área de influencia determinada por el usuario, asignándole la condición más desfavorable de la zona. Como resultado, se obtiene un mapa de jerarquización de la infraestructura crítica, identificando las zonas más susceptibles a remociones en masa.

Mediante esta herramienta se determinó que el 5,3% de las viviendas (118) y el 6,0% de las captaciones (9) de la base de datos del MINVU (2023) se ubican en zonas de muy alta o alta susceptibilidad a remociones en masa en un área de influencia de 200m para cada elemento. Estos resultados fueron contrastados con la información proporcionada por las unidades técnicas de emergencia y gestión del riesgo de los municipios afectados, para así determinar las zonas prioritarias.

Esta evaluación tiene un carácter preliminar y puede considerarse como una primera aproximación en la evaluación de riesgos. Aunque no reemplaza la necesidad de realizar validación en terreno, esta herramienta proporciona información valiosa que permite priorizar los lugares más críticos previo a una evaluación más detallada. Es un recurso importante para los tomadores de decisiones en la etapa de respuesta del GRD, ya que ayuda a identificar las zonas con mayor susceptibilidad a remociones en masa.

Una de las principales ventajas de esta herramienta es su gran versatilidad, ya que brinda al usuario la capacidad de realizar ajustes personalizados según su criterio experto, el contexto geográfico y la escala de análisis deseada. Lo que permite un resultado, a partir de criterios homogéneos, que agiliza el proceso de evaluación y reduce significativamente el tiempo de respuesta a la GRD en comparación a las prácticas convencionales, brindando así una valiosa contribución para una mejor preparación y protección de las comunidades afectadas por incendios forestales.

Palabras Clave: incendios forestales, ArcGIS Pro, susceptibilidad, Gestión del Riesgo de Desastres, herramienta geoespacial.

Agradecimientos: Este trabajo está patrocinado y auspiciado por SERNAGEOMIN. Siendo una contribución del Departamento de Geomática en apoyo a la asistencia técnica geológica.

Integración de conocimiento geológico con técnicas supervisadas y no supervisadas de aprendizaje estadístico para la clasificación de unidades

Ramón Alejandro Aguirre Maturana¹, Carlos Prades Koscina¹

(1) Unidad de Analítica Avanzada, Vicepresidencia de Desarrollo, Antofagasta Minerals S.A., Chile

Las herramientas de aprendizaje estadístico presentan oportunidades importantes para diferenciar y clasificar unidades geológicas. El acceso creciente en calidad y cantidad a métodos instrumentales y sensores hace de estas técnicas un complemento poderoso a la experticia geológica tanto observacional como interpretativa. La aplicación de estas técnicas se sustenta en mediciones precisas y exactas de propiedades de la roca proveniente de diversas fuentes, tales como análisis químicos multielementos e imágenes hiperspectrales.

Es necesario considerar que, por su naturaleza sintáctica, estas herramientas no pueden proveer contenido semántico, como la secuencia de eventos geológicos, su relación con la mineralización, y la agrupación y simplificación de unidades. Lo anterior es el fundamento de la interpretación geológica y la consecuente predicción espacial de leyes y otras variables geo-minero-metalúrgicas.

El presente trabajo muestra ejemplos de integración de técnicas de aprendizaje supervisadas y no supervisadas (Random Forest y Hierarchical Clustering) con conocimiento geológico adquirido durante la exploración, interpretación y modelamiento geológico de los yacimientos de cobre estudiados. Estos algoritmos principalmente predictivos son complementados con técnicas explicativas como SHAP, que permiten identificar aquellas variables que tienen más impacto en la clasificación de cada unidad geológica. Además, incorporando métricas como la entropía de información es posible cuantificar la incerteza en la predicción de variables categóricas para identificar oportunidades de mejora en la captura de datos.

Los resultados muestran que las observaciones y predicciones geológicas pueden ser efectivamente mejoradas con el apoyo de estas herramientas, y que estas permiten identificar y complementar las observaciones geológicas de una manera medible y repetible. La selección y procesamiento cuidadoso de las variables de entrada tienen efectos significativos en las predicciones, por lo que el entendimiento geológico orientado a objetivos concretos es la información de entrada más importante.

Palabras Clave: Aprendizaje estadísticos, Aprendizaje supervisado, Aprendizaje no supervisado, Random forest, Clustering.

Predicción de Nivel Freático para Módulos de una Pila de Lixiviación. Aplicación en Minera Antucoya - Antofagasta Minerals

**Matías Nicolás Castro Olmos¹, Carlos Prades Koscina¹, Matías Thayer Maggi¹, Mauricio Rojas Cortes¹, Benedicto Letelier Araya²,
Javiera Alfaro Echeverría²**

(1) Antofagasta Minerals, Vicepresidencia de Desarrollo - Analítica Avanzada, Apoquindo 4001, Santiago, Chile

(2) Minera Antucoya, Superintendencia de Metalurgia, Apoquindo 4001, Santiago, Chile

El nivel freático para un acuífero se define como la altura en la que la línea superficial del líquido iguala su presión con la presión atmosférica. Para un proceso de lixiviación, como el de Minera Antucoya de Antofagasta Minerals, que genera cátodos de cobre, un alto nivel freático en un módulo, o sector en donde se ha de apilar mineral de interés para su obtención, ha de generar impactos negativos en la recuperación de este como también problemas estructurales. La operación busca poder anticiparse a este eventual escenario.

En el siguiente trabajo, realizado en conjunto por Analítica Avanzada de la Vicepresidencia de Desarrollo de Antofagasta Minerals y la Superintendencia de Metalurgia de Minera Antucoya, se desarrolló un modelo predictivo en base a Aprendizaje Supervisado con distintas variables del apilado tales como leyes, geología, de operación, entre otras, que permiten poder indicar, en base a historia, si un módulo de la pila de lixiviación ha de presentar eventualmente escenarios de nivel freático alto.

Los equipos involucrados, en base al resultado del desarrollo, han de preparar acciones paliativas que permitan mantener el riego durante todo el ciclo de lixiviación proyectado para un módulo como también evitar los eventuales problemas estructurales que se puedan generar. Para poder focalizar qué medidas realizar, se desarrolló también una metodología que permite explicar, según las distintas variables de entrada, lo que ha de impulsar de forma significativa las distintas predicciones.

Se expondrá el esquema del modelo desde un punto de vista matemático, el trabajo de las distintas variables para aumentar el rendimiento de este, el desafío de validación involucrado que permite hacer confiable para la operación el uso del desarrollo, y también cómo con el uso de tecnología proveniente de plataformas en la nube hemos de acercar el trabajo a los distintos equipos. También comentaremos las limitaciones que el modelo puede tener como también pasos a seguir para que sea más robusto en el tiempo.

Palabras Clave: Nivel Freático, Machine Learning, Aprendizaje Supervisado, Geometalurgia.

Efecto del factor antrópico como condicionante en la génesis de aluviones y metodología para la evaluación de susceptibilidad de flujos: Una perspectiva geológica del Antropoceno en Santiago

Jorge Víctor Amestoy Herrera¹

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

El desarrollo geomorfológico Holoceno del relieve en América del Sur y Chile Central ha sido acompañado por procesos exponenciales de expansión inmobiliaria en las grandes urbes del continente. La ciudad de Santiago actualmente presenta un crecimiento exponencial del uso de suelo urbano desde 1985 aproximadamente, cumpliendo con procesos de urbanización e impactos antrópicos. Estos fenómenos urbanos identificados desde mediados del siglo XX son característicos por su impacto tanto directo como indirecto a los ciclos naturales geológicos y climatológicos. Tomando en cuenta que el territorio chileno es susceptible a sufrir diferentes eventos de peligro geológico, la culturización de prevención en la población ha sido deficiente, marcado por claros procesos de expansión hacia zonas susceptibles a peligros geológicos y con altas tasas de riesgo, principalmente en sectores piemontinos localizados tanto en la Precordillera de los Andes y en otros faldeos de geomorfologías estructurales.

El estudio de los procesos de desestabilización de laderas en las hoyas hidrográficas aplicadas en la conjunción del subandes y el piedemonte ha ido en avance, con un desarrollo de diferentes metodologías para el análisis de susceptibilidad de procesos gravitatorios y fluviales, contemplando diferentes factores geológicos gatillantes y condicionantes. El avance de los procesos urbanos actúa como una variable relevante de modificación de procesos geológicos, y este se ha visto integrado en diferentes actualizaciones a las metodologías, tratando de sopesar el avance del impacto humano definido formalmente como un evento geológico. Si bien el factor antrópico ha sido investigado exhaustivamente como un factor condicionante para la génesis de remociones de forma general, los resultados y productos geocientíficos han quedado subestimados por el gran avance del ser humano como variable natural. Distintos autores han evaluado la susceptibilidad de remociones en masa con métodos que ponderan al factor antrópico de forma secundaria logrando detectar unidades geomorfológicas potencialmente inestables, pero subestimando el peligro de otras. Este estudio complementa estas metodologías con un análisis del factor antrópico y reponderación de la variable con aplicación en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, ubicada en comuna de La Florida (Región Metropolitana de Chile), generando una actualización a la metodología de cálculo de índice de susceptibilidad para desestabilización de laderas publicado por Lara y Sepúlveda (2010), recalculando los índices previos con propuestas de actualización a la formulación, con un enfoque directo en analizar y estimar el factor humano como agente en los flujos de detritos. Además, se presenta un análisis exhaustivo del impacto humano en la geología y las definiciones formales del evento Antropoceno como un sustento bibliográfico para la actualización de factores condicionantes de flujos publicados, generando diferentes propuestas para identificar una formulación y conceptualización objetiva.

La metodología y las 3 formulaciones propuestas por este estudio basadas en la referencia del efecto del factor humano como condicionante en los procesos geológicos de remociones entrega 11 tipos de trazas antrópicas o de bioturbación humana en la cuenca y 4 mapas de índice de susceptibilidad de desestabilización de laderas para la Quebrada Tarapacá - Santa Rosa, utilizando a las formulaciones originales como producto comparativo para la definición de subestimación o sobreestimación de factores. La base de datos geológica respecto a las características de la cuenca para las 4 formulaciones utilizadas entrega una susceptibilidad alta de flujos de detritos para el sector bajo y central de la cuenca en estudio, mientras que el índice de cabecera es principalmente alto a muy alto, señalizado por las condiciones geomorfológicas de laderas escarpadas y con baja estabilidad geotécnica característica de los depósitos aluviales. El índice de la cuenca en las zonas bajas presenta un aporte principalmente por el efecto antrópico en las condiciones geotécnicas de las laderas, siendo definidas como laderas críticas por el impacto antrópico presente.

En base a las reformulaciones, se puede apreciar una variación entre los 4 índices de susceptibilidad calculados, donde la primera formulación se presenta como el cálculo más objetivo respecto a la formulación original. Si bien los datos entregados pueden ser considerados subestimaciones forzadas, el rango de interpolación de datos presenta consistencias y similitudes importantes respecto a la formulación original, por lo que al menos 1 de las propuestas de actualización es válida para el reanálisis de la susceptibilidad de desestabilización de laderas en procesos de remociones en masa.

Palabras Clave: Susceptibilidad, Flujos, Metodología, Desestabilización, Antrópico.

Referencias:

- Easton, G., Contardo, J. I., Tello, S. P., Cáceres, D. E., & Yáñez, C. J. (2018). ¿Urbanización fallada? La Falla San Ramón como nuevo escenario de riesgo sísmico y la sostenibilidad de Santiago, Chile. *Revista de Urbanismo*, (38), 1-20.
- Lara, M., & Sepúlveda, S. A. (2010). Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental earth sciences*, 60, 1227-1243.
- Lara, M., Sepúlveda, S. A., Celis, C., Rebollo, S., & Ceballos, P. (2018). Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. *Andean Geology*, 45(3), 433-442.
- Moragues, S., Lenzano, M. G., Lanfri, M., Moreiras, S., Lannutti, E., & Lenzano, L. (2021). Analytic hierarchy process applied to landslide susceptibility mapping of the North Branch of Argentino Lake, Argentina. *Natural Hazards*, 105(1), 915-941.
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ellis, E. C., Head, M. J., Vidas, D., Steffen, W., & Zinke, J. (2021). The Anthropocene: Comparing its meaning in geology (chronostratigraphy) with conceptual approaches arising in other disciplines.
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Williams, M., & Summerhayes, C. P. (Eds.). (2019). *The Anthropocene as a geological time unit: A guide to the scientific evidence and current debate*. Cambridge University Press.

Mapa de Máxima Probabilidad de Amenazas Múltiples de la Cuenca del Río Maipo: Primer Ejemplo en Chile

Felipe Aron¹⁻²⁻¹¹⁻¹², **Gabriel González**¹⁻³⁻¹¹, **Erik Jensen**¹⁻³⁻¹¹, **Jorge Gironás**¹⁻⁴⁻⁵⁻⁶, **Francisca Roldán**¹⁻³, **Esteban Sáez**¹⁻², **Rafael Aránguiz**¹⁻⁷, **Juan González**¹⁻⁷, **Horacio Gilabert**⁶⁻⁸, **Gabriel Candia**¹⁻⁹, **Alejandro Alfaro**¹⁰, **Cristián Escauriaza**¹⁻⁴

(1) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Macul, Santiago, Chile

(5) Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Macul, Santiago, Chile

(6) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Cambio Global UC, Macul, Santiago, Chile

(7) Universidad Católica de la Santísima Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Concepción, Chile

(8) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Macul, Santiago, Chile

(9) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Las Condes, Santiago, Chile

(10) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Providencia, Santiago, Chile

(11) *Estos autores contribuyeron de igual manera a este trabajo

(12) *Ahora en Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

A medida que la población crece y se expone a amenazas más dañinas y frecuentes en un clima cambiante, las naciones deben adaptarse y decidir bien qué, cómo y dónde construir. Para esto, se requiere una mirada integrada e informada de todas las amenazas que acechan al territorio, y así planificar soluciones de adaptación para la infraestructura presente y futura. En este trabajo desarrollamos un modelo guía pionero para caracterizar de manera integrada las amenazas naturales y construir el primer mapa de multi-amenazas de Chile. Elegimos el caso piloto de estudio de la cuenca hidrográfica del Río Maipo, que cubre las regiones Metropolitana y sectores de Valparaíso y O'Higgins, concentra casi un tercio de la población del país y alberga gran parte de la infraestructura crítica nacional. En este espacio geográfico, emplazado en el ante-arco del margen de subducción de Chile central, confluyen diversas amenazas con altas tasas de recurrencia comparadas al resto del territorio, de las cuales analizamos: remociones en masa (caída de rocas, deslizamientos y aluviones), inundaciones, incendios forestales, terremotos (corticales y de subducción), tsunamis y erupciones volcánicas. La zona cumple con las condiciones que la definen como vulnerable ante el cambio climático global, haciéndola más susceptible aún a experimentar desastres.

Los eventos naturales no pueden ser evitados pero sus impactos pueden mitigarse para que no se constituyan en desastres, primeramente, conociendo y entendiendo la línea de base de amenazas que afectan al territorio. Si bien se ha avanzado bastante en la caracterización de las amenazas en Chile, se carece de una visión integrada y sistémica de estas. En general, tanto los catastros de eventos pasados como los mapas de amenazas se encuentran dispersos en bases de datos de diferentes organismos públicos, consultoras privadas y en la literatura científica. Esta fragmentación de la información dificulta el acceso y análisis técnico, generando confusión en los tomadores de decisiones. Además, la conceptualización aislada de las amenazas y el uso de diferentes variables para su cuantificación complica la integración y su análisis en conjunto. Finalmente, la falta de consideración de interrelaciones y efectos en cascada contribuye a subestimar la exposición real de algunos lugares del territorio. Sólo con un mapeo estandarizado, sistematizado e integrado de las amenazas naturales se puede tener un real diagnóstico de la exposición.

En este trabajo adoptamos una aproximación probabilística inédita para la estimación combinada del impacto de amenazas múltiples. Primero, compilamos un catálogo exhaustivo de ocurrencias históricas y geológicas de eventos dañinos, determinamos las condiciones in-situ de susceptibilidad para generar y/o amplificar intensidades de amenaza en el territorio, y definimos una escala de umbrales de excedencia de intensidad para cada amenaza, que de superarse causaría una afectación significativa a la infraestructura y población. Este último paso es necesario para unificar, bajo el parámetro común de probabilidad de excedencia u ocurrencia, amenazas con distintas variables físicas de afectación y que actúan a distintas escalas temporales y espaciales. Luego, se emplearon técnicas estándar y desarrollos metodológicos nuevos para calcular probabilidades de excedencia de los umbrales definidos a distintas ventanas temporales de observación, expresadas en grillas espacialmente coincidentes para cada amenaza. Se consideraron tanto procesos independientes como la probabilidad conjunta de procesos concatenados y en cascada (e.g., tsunamis gatillados por terremotos y remoción en masa por lluvias intensas y/o terremotos). Al combinar y superponer las grillas, obtuvimos mapas de probabilidad máxima de multi-amenaza para la cuenca, que muestran una visión integral de la diversidad de exposición del territorio para experimentar eventos potencialmente desastrosos, y de cómo esta cambia a medida que se amplía el rango de observación temporal. Como resultados de impactos transversales de este proyecto, se desarrolló la plataforma web SIGMA (Sistema de Información Geográfica Multi-Amenaza) para visualización y descarga de los productos, y se publicó una guía metodológica para la caracterización de la multi-amenaza. Estos productos se transfirieron exitosamente a SERNAGEOMIN para su puesta en valor como bien de uso público de planificación y toma de decisiones a distintos niveles, tanto institucionales como público en general. Apuntamos a que este piloto sea, a su vez, escalable y exportable al resto del país y eventualmente a otras naciones.

Palabras Clave: Multi-amenazas, Probabilidades de excedencia, Cuenca del Maipo, Región Metropolitana de Chile.

Financiamiento: FONDEF-ID19I10021, ANID, Chile (2020 – 2021).

Predicción de ocurrencia de remociones en masa desencadenadas por lluvias en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana de Santiago

Antonio Andrés Muñoz Muñoz¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

Las remociones en masa desencadenadas por lluvias son las más frecuentes y las que han generado mayor cantidad de víctimas fatales en Chile (Marín *et al.*, 2018). Para abordar esta problemática, el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) utiliza minutas técnicas elaboradas a partir de pronósticos meteorológicos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Estas minutas tienen como objetivo evaluar cualitativamente (baja, moderada, alta y muy alta) la posibilidad de ocurrencia de remociones en masa en una zona determinada. Actualmente, esta evaluación se basa en la interpretación de eventos históricos realizada por expertos, ya que no se han implementado métodos cuantitativos.

Basado en lo anterior, para reducir la subjetividad en las predicciones realizadas por Sernageomin, en este trabajo se aplican técnicas de clasificación orientadas en *machine learning*, tales como, regresiones logísticas, árboles de clasificación y *Random Forest*. Estas técnicas se han aplicado tanto para respuestas binarias como de multiclase, específicamente en dos zonas morfoclimáticas: cordillera y precordillera, previamente definidas por la DMC. Para esto, se utilizan como variables predictoras la lluvia acumulada (mm), su duración (días), su intensidad promedio (mm/día) y la altitud de la isoterma 0°C. Como caso de estudio se opta por la comuna de San José de Maipo en virtud de las siguientes características que presenta este territorio:

1. Amplio registro: 41 eventos documentados, en un periodo de 31 años.
2. Fuerte impacto en la población: en la comuna han muerto 56 personas por remociones en masa en la comuna (Marín *et al.*, 2018). y producto de los aluviones ocurridos en la misma, hasta casi 7 millones de personas de la región Metropolitana han sufrido el corte de suministro de agua potable (Muñoz *et al.*, 2018).
3. Su territorio coincide en términos hidrográficos con la parte alta de la cuenca del río Maipo. Por lo tanto, se puede subdividir en precordillera y cordillera.

Los resultados obtenidos dan cuenta que la técnica de *Random Forest* tiene el mejor desempeño según curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y exactitud, entre otras. Lo anterior, para las dos zonas morfoclimáticas y para ambos tipos de respuesta. Para el caso binario se logran predicciones aceptables a excelentes, mientras que para los multiclases son aceptables a muy buenas para las clases baja y moderada, pero no concluyentes para alta y muy alta, debido a la reducida cantidad de datos, aunque prometedores para estudios futuros.

Finalmente, se discuten las limitaciones de este trabajo y los aspectos a explorar para trabajos futuros.

Palabras Clave: remociones en masa, predicción, machine learning.

Financiamiento: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile.

Agradecimientos: Este trabajo fue guiado por la doctora Valeria Jocelyn Leiva Yamaguchi y co-guiado por María Constanza Prado Stuardo.

Referencias:

- Marín, M.; Muñoz, A.; Naranjo, J. A. 2018. Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). Servicio Nacional de Geología y Minería. Universidad de Concepción Concepción. In Congreso Geológico Chileno Geociencias hacia la comunidad, No. 15: 2 p.
- Muñoz A.; Marín M.; Galecio J.E.; Osorio C. 2018. Diseño de un sistema piloto de remociones en masa en la cuenca del estero San Alfonso, comuna San José de Maipo, región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería en colaboración con el Instituto Nacional de Hidráulica (INH). Informe Registrado IR-18-69: 131 p.

Plataforma digital para el análisis y categorización de peligros asociados a eventos de caída de rocas y aluviones para la planificación sustentable de rutas industriales de faenas mineras

**Rodrigo Osorio Alvarez¹, Paulina Arellano Cortés¹, Constanza Celis Sáez¹, Leonardo Carreño Osorio¹, Carlos Sierra Rojas¹,
Nicolas Labbe Rubio¹**

(1) WSP, Mecánica de Rocas, Magdalena 181, Santiago Chile

Se ha desarrollado una estrategia integral de gestión del riesgo de caída de rocas para la red de caminos de una operación minera, que abarca más de 130 km de extensión. La estrategia se fundamenta en la implementación de un sistema semicuantitativo de clasificación de peligros de caída de rocas, la generación de catastro de eventos, la evaluación y registro de las medidas de mitigación existentes.

Los procesos relacionados con la caída de rocas representan peligros geológicos significativos, con el potencial de poner en riesgo la seguridad de los trabajadores, interrumpir la red vial operativa y, como consecuencia, ocasionar pérdidas significativas.

El objetivo principal de este estudio es presentar una plataforma de trabajo integrada que considere un mapeo detallado y categorizado del peligro de caída de rocas a lo largo de la red vial, la conformación de un catastro histórico de caída de rocas, el registro de obras de mitigación existentes y recomendaciones para la instalación de nuevas obras de mitigación. Esta plataforma permite mantener una actualización continua de la información en la plataforma, facilita la reportabilidad de eventos de caída de rocas y gestiona las medidas de mitigación existentes. La herramienta también permite realizar un seguimiento y calibración periódicos de la clasificación de peligro de caída de rocas en la red vial.

La plataforma ha demostrado su capacidad como una herramienta integral para la gestión del riesgo. Su funcionalidad abarca la identificación, ubicación, seguimiento y alerta oportuna de los peligros identificados de manera eficiente. Esto, a su vez, facilita la priorización de los esfuerzos de mitigación, la delimitación de zonas seguras para el tránsito de vehículos y peatones, así como la correcta ubicación de campamentos, estacionamientos y salidas de emergencia, entre otros aspectos relevantes. Esta plataforma ofrece una alternativa integrada, efectiva y práctica para la gestión de riesgos y planificación de recursos en los caminos industriales de la operación minera.

Palabras Clave: Caída de rocas, gestión de riesgos, Peligros geológicos, Sistema semicuantitativo de clasificación de peligros.

Modelación y evaluación de la susceptibilidad de eventos de remoción en masa utilizando algoritmos de aprendizaje automático en la cuenca de Río Bueno, región de los ríos, Chile

Francisco Parra Ortiz¹, Ignacio Carvajal², Mauricio Marín¹

(1) Universidad de Santiago, Informática, Ingeniería, Las Sophoras 165, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Ciencias físicas y matemáticas, Av. Blanco Encalada 2200, Santiago, Chile

Resumen

Los eventos de remociones en masa corresponden a uno de los mayores peligros geológicos, particularmente en Chile. El objetivo primordial del presente estudio es la evaluación de la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático (Random forest, XGBoost, LightGBM, SVM y Bart) y la comparación de los resultados entre ellos para un modelamiento de susceptibilidad de remociones en el sector de la cuenca de Río Bueno, Región de los Ríos, Chile. Son identificadas, utilizando múltiples fuentes, un total de 171 localidades, en conjunto de otras 171 localidades como puntos en donde no existe ocurrencia de remociones, las cuales son divididas de forma aleatoria, para posteriormente, realizar un proceso de validación cruzada espacial, con el objetivo de calcular la precisión de los modelos. Luego, en base a 24 factores condicionantes se escogen 10 de estos. Dicha elección está basada en la confección de un ranking general de los factores a partir de la aplicación de múltiples filtros. El rendimiento de los modelos es evaluado por medio del área bajo la curva ROC (AUC). Para el estudio del comportamiento estadístico del modelo, se aplica el test estadístico no paramétrico de Friedman, mientras que para la comparación del rendimiento con los otros algoritmos se utiliza el test no paramétrico de Nemenyi, para comparar entre cada uno de los modelos. Entre los algoritmos utilizados en este estudio, el Random forest es el que presenta el valor más alto de precisión AUC con respecto a los otros modelos, pudiendo ser utilizado para los mismos fines en otras áreas geográficas de características similares. Los resultados de este estudio son útiles para un impulso en la investigación y desarrollo de estas técnicas, e incluso, pueden ser usados con motivos de planificaciones territoriales, reducción de riesgo de remociones, y decisiones de prevención en áreas cercanas.

Introducción

En Chile, los eventos de remoción en masa se encuentran entre los riesgos geológicos más importantes, junto con los terremotos, la actividad volcánica y las inundaciones. Las características geológicas, geomorfológicas, tectónicas y climáticas del país, controladas por la presencia de sus Cordilleras, de los Andes en su margen oriental, y de la Costa en su margen occidental, tienen como consecuencia una alta susceptibilidad a la generación de movimientos en masa, tales como deslizamientos de suelo y rocas, flujos y caídas. A pesar de lo anterior, las situaciones de riesgo en gran parte de los casos no son tomadas en cuenta en políticas de ordenamiento territorial.

En base a reportes de fatalidades y daños económicos generados por estos eventos, el reconocer las áreas susceptibles a remociones en masa y el determinar su nivel de riesgo, son pasos cruciales que se deben tomar para la evaluación de estos peligros. Así, en el último tiempo, se han realizado contundentes investigaciones en los métodos de remociones, utilizando herramientas y nuevas tecnologías para la aceleración en el desarrollo de este campo, para su uso por ejemplo en manejo de crisis en áreas montañosas o aledañas a ellas. Dado lo anterior, es que para lograr la obtención de un mapa de susceptibilidad de remociones en masa que sea preciso y confiable, se deben probar y evaluar métodos cuantitativos para asegurar un mejor manejo de áreas montañosas. Los sistemas de información geográfica (GIS) son utilizados en la confección de mapas de susceptibilidad, correspondiendo a métodos efectivos para localizar y delimitar áreas propensas a las remociones, logrando confeccionar una base de datos geoespacial de ocurrencia, o un inventario detallado y riguroso. Utilizando además fuentes de datos GIS, se pueden obtener propiedades geoespaciales de las ubicaciones de las remociones en masa que pueden afectar la estabilidad potencial de la pendiente, que son conocidos como factores condicionantes de remociones (FCR), logrando ser compiladas en una base de datos.

Los métodos de aprendizaje automático se han empleado en problemáticas ingenieriles y científicas por más de dos décadas. Por ello, es que la aplicación de estas técnicas en áreas de las geociencias y los sensores remotos es bastante reciente y limitada. El aprendizaje automático se orienta en la extracción automática de información a través de datos usando métodos computacionales y estadísticos. Las áreas de aplicación son bastante variadas, e involucran diversos temas como lo son la caracterización de macizos rocosos, productos de océanos, índices de vegetación, etc. Hoy en día, los métodos de análisis de datos tienen una tarea primordial en geociencias y sensores remotos. Mientras que, por un lado, la recolección de grandes volúmenes de datos es fundamental en terreno, el análisis de esta información se presenta como un desafío aún mayor.

El objetivo general de este trabajo es la construcción de un modelo de susceptibilidad del sector de la cuenca de Río Bueno, que permita la identificación de las zonas más expuestas al riesgo de remociones, utilizando para ello diversos algoritmos de aprendizaje de máquinas (Ranger, XGBoost, LightGBM, SVM y Bart), comparando su rendimiento.

Metodología

Con el objetivo de estudiar la relación existente entre la predicción espacial de las remociones en masa y los factores condicionantes relevantes, es necesaria la utilización del registro más actualizado posible de este tipo de eventos. Debido a esto es que para obtener un inventario confiable y en detalle para el área de interés, se hará uso de datos obtenidos de trabajos anteriores, los cuales serán a su vez sometidos a revisión mediante interpretaciones de laboratorio.

La identificación y localización de las remociones, se consigna gracias a la revisión de la base de datos nacional suministrada por Sernageomin, en conjunto con una búsqueda bibliográfica, interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Esta información es gestionada gracias al software Qgis y mediante scripts creados en el lenguaje de programación R, que posee las instrucciones necesarias para el correspondiente procesamiento geoespacial de los datos y la extracción de las características de interés.

Para la realización de la tarea, fueron utilizadas 171 localizaciones de eventos de remoción en masa dentro de la zona de interés, y otras 171 localidades como puntos en donde no ocurren remociones, esto con el motivo de balancear el conjunto de datos. De todos modos, al recurrir a una cantidad de datos pequeña, se hace necesario utilizar un proceso de validación cruzada, para obtener un AUC promedio que podrá servir luego de comparativa entre los modelos utilizados.

Para la selección de factores condicionantes, fueron usados 24 factores relacionados a las remociones, los que se obtuvieron fundamentalmente a partir DEM de la zona, conseguido del proyecto AW3D30, en conjunto con su respectivo análisis mediante Qgis, R y sus múltiples paquetes de geoprocésamiento, en adición de imágenes satelitales suministradas por la campaña LANDSAT 9, las que incorporan ocho bandas espectrales que se pueden combinar con el fin de detectar características en el terreno. A partir de lo anterior, el ángulo de la pendiente, el aspecto, y la elevación sobre el nivel del mar fueron seleccionados.

Por otro lado, los índices normalizados NDVI, GNDVI, EVI, NDMI, NBRI, BSI, NDWI, NDGI se obtuvieron mediante imágenes provenientes de entre enero y febrero de 2023. Posteriormente, para el análisis de aprendizaje automático y los correspondientes algoritmos, los valores de las distintas clases en relación a cada factor, son ingresados y procesados mediante R.

Resultados

Para la determinación de qué factores contribuyen al rendimiento de los modelos, éstos fueron evaluados por las múltiples técnicas (AUC, ANOVA, DISR, INFORMATION GAIN, JMI, JMIM, MIM, RMRM, PERFORMANCE, PERMUTATION, RELIEF, VARIANCE e IMPURITY) en el área de estudio.

Además, se mide la correlación entre los 24 factores, descartando del análisis a los que contengan un menor impacto (es decir, que estén más bajos en el ranking) y que posean alta correlación con otros factores que impacten en mayor medida en el modelo. El criterio para descartar factores mediante correlación, corresponde a que el valor absoluto de correlación entre ellos, no superen un valor absoluto de 0,7. A partir de esta perspectiva, es que son excluidos del análisis B2, B3, B7, Aspecto, TRI, Pendiente, Proximidad Red Hidrológica, EVI, NDWI, GNDVI, NDGI, BSI, NBRI y NDMI, quedando así, para la construcción final del modelo, 10 factores, mencionados a continuación en orden de importancia: B4, B1, B5, B10, B6, Elevación, Hillshade, Proximidad Red Vial, NDVI y TPI.

Dentro de la evaluación del modelo, se usan factores incluyendo a la curva ROC promedio entre todas las iteraciones generadas vía validación cruzada, y en conjunto con el área respectiva que se genera bajo la curva, AUROC. Los valores de AUROC difieren entre valores de 0,5 y 1, donde 0,5 conlleva tener una precisión equivalente a un modelo establecido por el azar, mientras que por otro lado, 1 representa el modelo ideal, que posee la mayor área bajo la curva.

Teniendo en cuenta los hiperparámetros y utilizando los factores que poseen una mayor información, los modelos Ranger, XGBoost, LightGBM, SVM y Bart son obtenidos.

Discusión

Predecir espacialmente eventos de remociones es considerada una labor compleja en asuntos de evaluar riesgos de desastres naturales. Varios métodos han sido propuestos, sin embargo, la precisión de las predicciones obtenidas, continúan siendo un asunto controversial. El avance en campos de aprendizaje automático y en sistemas de información geográfica, llevan a la creación y desarrollo de técnicas y métodos, no obstante, se hace necesario todavía la exploración y el estudio de estos nuevos modelos.

En la presente investigación, este asunto es abordado mediante la evaluación, análisis y comparación de 5 modelos algorítmicos basados en aprendizaje automático, de entre los cuales, no se logró obtener el mapa de susceptibilidad del modelo Bart, esto dado a que se excedieron los recursos computacionales para su generación, sin embargo, al no encontrarse dentro de los modelos más óptimos presentados, se considera únicamente como pérdida el hecho de no obtenerlo para su posterior comparación con otros de los modelos, ya que, para asuntos de uso de mapas para visualización de zonas susceptibles, hay mejores opciones dentro de los modelos ya presentados. De manera general, Random Forest y SVM obtienen los mejores resultados en comparación a los otros modelos, en términos de clasificación.

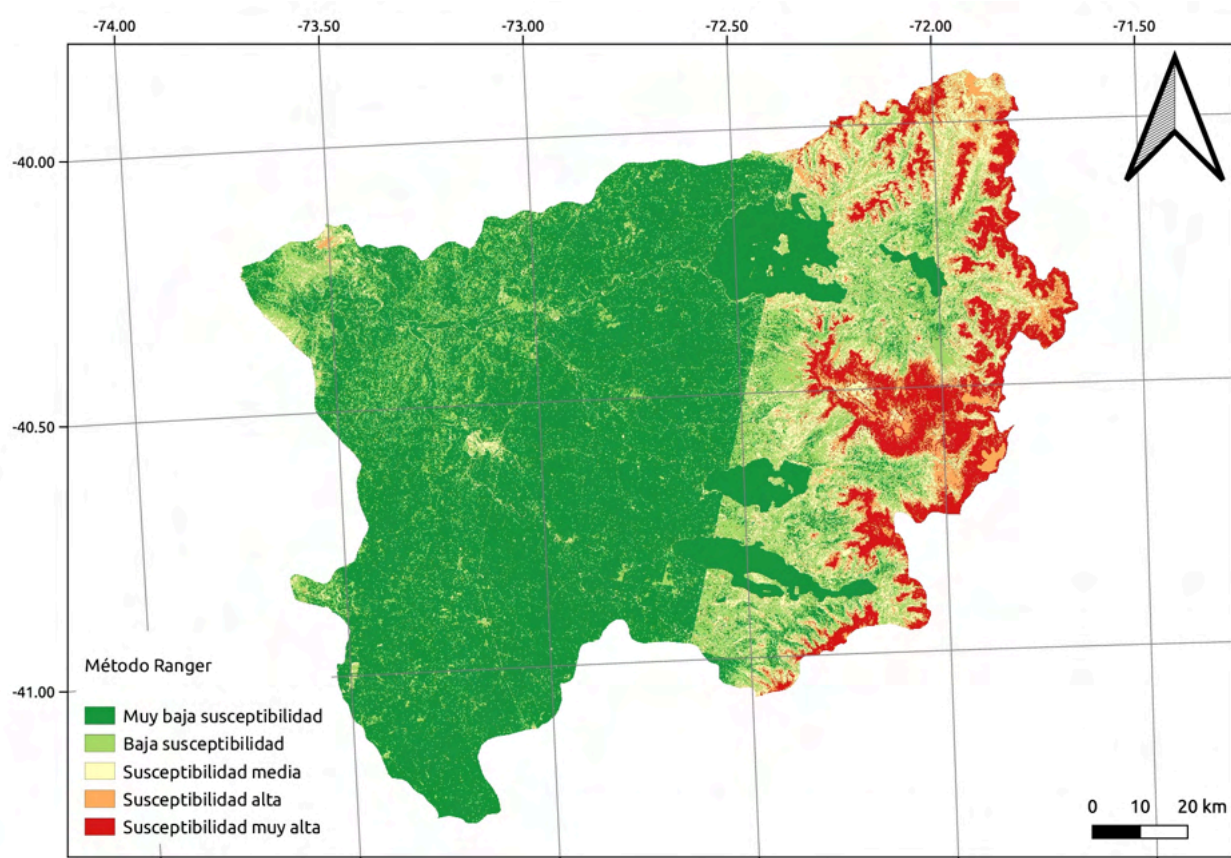
Por otro lado, para afinar los hiperparámetros y de dicha manera obtener mejores rendimientos, fueron de utilidad recursos computacionales a partir de una búsqueda realizada por grilla mediante la confección de espacios de búsqueda apropiados para cada modelo. El modelo que requirió de una mayor cantidad de parámetros sintonizados corresponde a Ranger, del cual se obtuvo un rendimiento bastante óptimo, mientras que los que requerían una menor cantidad son el SVM y Bart, a pesar de esto último, el modelo SVM presenta también un gran rendimiento.

Desde el punto de vista de la métrica AUC, los cinco modelos poseen valores similares (a excepción del modelo Bart, que posee el valor más bajo), siendo Random forest (RF) el que obtiene el más elevado. A partir de lo anterior, se podría concluir que RF correspondería al modelo más riguroso, no obstante, cabe recalcar que usar sólo dicha métrica puede que no garantice el mejor acercamiento a un modelo con alta precisión espacial. Por ello, es que son requeridas otras medidas para una buena evaluación estadística. Gracias al test estadístico de Friedman, se logró demostrar que hay diferencias significativas entre modelos. Dado todo lo anterior y a partir de un análisis general, se deduce que RF corresponde al mejor de los modelos aquí presentados, puesto que, como se mencionó, posee el mayor valor AUC y además posee diferencias estadísticas significativas con todos los modelos.

La elección de factores influyentes es un paso fundamental que incide en la calidad de los modelos de susceptibilidad. A pesar de que han sido propuestos una variedad de métodos para el paso de selección de factores (entre los que es posible encontrar la correlación lineal y el test de Kolmogorov-Smirnov), los lineamientos generales para esta selección continúan siendo asunto de debate.

En la literatura han sido aceptados factores topográficos, geológicos, de suelo, hidrológicos, geomorfológicos y antrópicos en la mayor parte de los modelos de susceptibilidad generados. Es importante, sin embargo, tener en cuenta de la existencia de factores que, al no poseer una capacidad predictiva, en lugar de favorecer al modelo, provocan ruido, perjudicando en la calidad final de este. Es crucial también, descartar factores que posean un índice alto de correlación entre sí (como se hizo en el presente trabajo), para de esta forma, poder aplicar de manera efectiva la validación cruzada.

En el presente estudio, fueron considerados 10 de los 24 factores inicialmente definidos. La elección de ellos se basa en su posición en el ranking efectuado y en los bajos valores de correlación obtenidos entre ellos. Este método de elección de factores fue ratificado, gracias a los óptimos valores de rendimiento generados por la métrica AUC para cada modelo, de los que sólo encontramos valores por sobre los 0,93.



Cuenca Río Bueno - Mapa de susceptibilidad

Conclusiones

El presente trabajo consiste en un aporte a partir de una comparación de naturaleza sistemática y de una valoración de cinco modelos de aprendizaje automático utilizados con propósitos de modelamiento de susceptibilidad de remociones en masa. Los temas y objetivos aquí abordados correspondieron a:

- (1) Identificación y localización de remociones en masa para la generación de un inventario, a partir de registros históricos, informes de investigación y análisis de imágenes aéreas;
- (2) Selección de factores o características relevantes utilizando una multiplicidad de filtros;
- (3) Evaluación de los modelos y su posterior comparativa utilizando la curva ROC y ciertas medidas de evaluación estadísticas;
- (4) Construcción de mapas de susceptibilidad de remociones en masa en el sector de la cuenca de Río Bueno;
- (5) Corroboración de la variación significativa de la capacidad predictiva de los modelos.

Con respecto a esta área de estudio en particular, se observa que la técnica del uso de filtros en su conjunto, puede ser utilizada de manera óptima para una buena selección de características influyentes en procesos de remociones en masa.

Por otro lado, se obtuvo que el modelo Ranger alcanza los resultados más óptimos entre todos los modelos, usando como criterio la métrica AUC y distintos tests estadísticos que corroboran la diferencia entre este y los otros modelos presentados. Todos los modelos algorítmicos aquí trabajados poseen una capacidad de predicción mayor al 90% lo que es un gran resultado, y lleva a concluir que estos modelos pueden ser considerados como técnicas adecuadas para el mapeo de susceptibilidad de remociones. Finalmente, y a modo de conclusión, los resultados obtenidos a partir de este trabajo podrían ser beneficiosos para un mayor desarrollo e investigación en este tipo de técnicas, e incluso en ámbitos de tomas de decisiones y diseños de políticas en áreas susceptibles a la ocurrencia de eventos de remociones en masa.

Palabras Clave: Remoción en masa, Machine learning, Remote sensing, Random forest, Río Bueno.

Financiamiento: Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Chilena de Investigación y Desarrollo (ANID) en el marco de la subvención Centro Basal CeBiB código FB0001.

Referencias:

- [1] Yange Li, Xintong Liu, Zheng Han, and Jie Dou, 2020. Spatial Proximity-based geographically weighted regression model for landslide susceptibility assessment: a case study of qingchuan area, China," *Applied Sciences*, vol. 10, no.3, pp. 1107, 2020.
- [2] Yi Wang, Zhice Fang, and Haoyuan Hong, 2019. Comparison Of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in yanshan county, China, *Science of the total environment*, vol. 666, pp. 975–993.
- [3] Viet-Hung Dang, Nhat-Duc Hoang, Le-Mai-Duyen Ngu-yen, Dieu Tien Bui, Pijush Samui, et al., 2020. A novel gis-based random forest machine algorithm for the spatial prediction of shallow landslide susceptibility," *Forests*, vol. 11, no. 1, pp. 118.
- [4] Ubydul Haque, Paula F Da Silva, Graziella Devoli, Jürgen Pilz, Bingxin Zhao, Asmaa Khaloua, Wahyu Wi-lopo, Peter Andersen, Ping Lu, Juneseok Lee, et al., 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014), *Science of the Total Environment*, vol. 682, pp. 673–684.
- [5] Dieu Tien Bui, Tran Anh Tuan, Nhat-Duc Hoang, Nguyen Quoc Thanh, Duy Ba Nguyen, Ngo Van Liem, and Biswajeet Pradhan, 2017. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the lao cai area (vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization, *Landslides*, vol. 14, no. 2, pp. 447–458.
- [6] Hamid Reza Pourghasemi and Omid Rahmati, 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision?" *Catena*, vol. 162, pp. 177–192, 2018
- [7] Dieu Tien Bui, Paraskevas Tsangaratos, Viet-Tien Ngu-yen, Ngo Van Liem, and Phan Trong Trinh, 2020, Comparing The prediction performance of a deep learning neural network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment, *Catena*, vol. 188, pp. 104426.

Análisis de susceptibilidad de deslizamientos de suelo mediante el uso de redes neuronales artificiales aplicada a la cuenca del estero San Alfonso, San José de Maipo, Chile

Vicente Rojas Caballero¹, Alejandra Serey Amador², Cristina Ortega¹, Carlos Andrade Fuentes³

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, ingeniería y tecnología, Av. Manuel Montt 367, 7500994 Santiago, Providencia, Región Metropolitana, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins #611, Rancagua, Chile

(3) AFRY PÖYRY (CHILE) LTDA., Peligros Naturales, Los Militares 5001, 7560955 Las Condes, Región Metropolitana, Santiago, Chile

El objetivo principal de este trabajo es presentar el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de suelo, realizado por medio de la aplicación de una metodología de redes neuronales artificiales en la cuenca de San Alfonso, San José de Maipo, Chile.

Los deslizamientos son procesos geodinámicos y climáticos que periódicamente causan pérdidas humanas, daños económicos y sociales. Chile, lejos de ser la excepción, se ve constantemente enfrentado a estas amenazas debido al contexto andino. Esto, sumado al aumento en la frecuencia con que ocurren estos eventos producto del cambio climático y la actividad antrópica, hace necesario el desarrollo de nuevas metodologías y herramientas que optimicen la forma en que se realizan los estudios de la dinámica de estos fenómenos naturales.

En este proyecto se aplicó la metodología de redes neuronales artificiales para evaluar la susceptibilidad de deslizamientos de suelo. Se generó un catastro binario indicando los puntos de ocurrencia y los puntos de no ocurrencia, para luego generar una base de datos que incluye los valores de 8 factores condicionantes: (1) Geología/Geotecnia, (2) Geomorfología, (3) Pendiente, (4) Distancia a la red de drenaje, (5) Curvatura, (6) Aspecto, (7) Índice de humedad topográfica y (8) Factor LS (efecto combinado de la longitud y el ángulo de inclinación de las laderas, parte de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo).

El siguiente paso fue la etapa de entrenamiento y aprendizaje, en la que se utilizó el algoritmo de aprendizaje de retropropagación del error para entrenar la red neuronal artificial, de forma que pudiera identificar los patrones de valores asociados a los factores condicionantes que determinarían la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento. Posteriormente, se evaluó el rendimiento del modelo de red neuronal artificial utilizando herramientas de validación numérica como la matriz de confusión y la curva ROC/AUC.

El mapa resultante se procesó en un software GIS para definir las clases de susceptibilidad relativa. Los resultados indicaron que los 3 factores condicionantes más relevantes eran la geología/geotecnia, la geomorfología y la pendiente.

Por último, el mapa se interpretó y validó visualmente comparándolo con el inventario de entrenamiento, en el que se identificaron y analizaron en detalle 5 puntos de conflicto.

Palabras Clave: Susceptibilidad, Deslizamientos, Inteligencia Artificial, Remociones en Masa, Factores Condicionantes.

Integrating satellite, stratigraphic and eyewitness data to map the 2010 Chilean tsunami inundation through its deposit one decade after

Bladimir Saldaña¹⁻²⁻³, Marco Cisternas¹⁻²⁻³, Roberto Chávez², Diego Aedo¹⁻²⁻³, Mario Guerra²⁻³ Alexandra Carreño²

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Instituto de Geografía, Valparaíso, Chile

(3) Núcleo Milenio The Seismic Cycle Along Subduction Zones CYCLO, Valdivia, Chile

Coastal communities exposed to tsunamis require a comprehensive risk assessment, including the potential inundation area. This area can be inferred, as a first approach, from the inland extent of sand deposits left by previous tsunamis. However, tsunami deposits can be extensively disturbed, resulting in an underestimation of the inundation. On the Lipimávida-Iloca coast, about 60% of the deposit left by the 2010 Chilean tsunami was promptly removed by human or natural causes. Here we show that inundation areas can be mapped with reasonable accuracy even a decade later by integrating diverse types of complementary data. Specifically, a supervised classification model was trained by pre- and post-tsunami satellite imagery, and ground truth data from stratigraphic observations in pits and testimonies of 2010 tsunami survivors. Our model shows the 2010 tsunami deposit marked by an extensive but discontinuous sand cover extending 50-600 m inland. While deposit runups were between 4 and 8 m, with local maximums up to 10 m. These data consistently matched field observations and information previously reported from other post-tsunami surveys. Measurements of the landward extent of the deposit and its runup were comparable to tsunami inundation, averaging ~90% of what water actually reached inland. Additionally, satellite mapping also revealed a ~40 m coastal retreat along the entire Lipimávida-Iloca coast that we interpret was triggered by the sudden coseismic subsidence of the 2010 earthquake and subsequent tsunami erosion. Our results highlight the usefulness of the spatial distribution of tsunami deposits for mapping inundation areas, however, approaches that integrate multiple datasets are recommended to be used. Finally, we point out that areas that were covered by the 2010 tsunami deposit could not only be considered inundation areas for future tsunamis but also potential sites to search for the sedimentary record of the historical and prehistoric predecessors of the 2010 event.

Keywords: 2010 tsunami deposit, Satellite imagery, Survivor testimonials, Stratigraphic observations.

Financiamiento: This research project was funded by the National Agency for Research and Development (ANID) through the National Doctorate Grant 21191266, the FONDECYT project N° 1190258 and Núcleo Milenio CYCLO.

Agradecimientos: We extend our thanks to the community living on the Lipimávida-Iloca coast, kind and hardworking people who facilitated our research.

Distributed Acoustic Sensing as a tool for monitoring geohazards

Verónica Elgueta¹, Bradley Lipovsky¹

(1) University of Washington, Earth and Space Science, Johnson Hall Rm-070, Box 351310, 4000 15th Avenue NE Seattle, WA 98195-1310, Seattle, USA

Many geologic processes and events in the subsurface and surface of the Earth are not fully understood because of seismic observation bias. Distributed Acoustic Sensing (DAS) is a new approach to seismology that can help reduce this bias by having a broader spatial coverage, especially in areas that are poorly covered by traditional sensors. DAS converts fiber optic cables for telecommunications into dense seismic arrays. The ubiquitous expansion of fiber optic networks has opened new avenues for scientific exploration with the potential to benefit geohazards studies of earthquakes and volcanoes.

The University of Washington Fiber Lab has recently begun monitoring seismic events in the Pacific Northwest using DAS on several cables. In the past year, a fiber optic cable with a length of 12 km was recording data for around one year in the Puget Lowlands, Washington, USA. Part of the cable was on the road, and another was buried in the seafloor in Saratoga Passage of the Puget Sound. The data collected with this cable allows us to study wavefield complexity in diverse geological settings. The Puget Sound counts with a dense array of seismometers managed by the Pacific Northwest Seismic Network (PNSN) that works as a signal reference in our study.

Here, we present initial work surrounding the creation of a curated catalog of DAS waveforms of local, regional, and teleseismic earthquakes. We have studied the sensitivity of the cable to earthquake ground motion. We are able to detect local earthquakes, under Mw 2, within a radius of 20 km from the fiber. Moreover, we have observed differing cable responses in the different environments the cable traverses. For example, the part of the cable in the subsea shows an amplified response to seismic events resulting from the excitation of Scholte waves. Our DAS waveforms show clipping, even for events with an epicentral distance of several hundred km. For all of the above, fiber optic technology can potentially be used to monitor volcanic environments and geohazards in general.

Keywords: fiber optic, earthquakes, volcanoes, monitoring.

Financing: University of Washington.

References:

- Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R., ... & Ajo-Franklin, J. B. (2017). Fiber-optic network observations of earthquake wavefields. *Geophysical Research Letters*, 44(23), 11-792.
- Lindsey, N. J., & Martin, E. R. (2021). Fiber-optic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 309-336.
- Nishimura, T., Emoto, K., Nakahara, H., Miura, S., Yamamoto, M., Sugimura, S., ... & Kimura, T. (2021). Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system. *Scientific reports*, 11(1), 6319.

Unraveling the microseismic activity of the Puerto Aldea Fault, Coquimbo Region: Seismic hazard assessment along coastal La Serena-Tongoy

José González-Alfaro¹, Bertrand Potin², Sergio Ruiz², Francisco Pastén-Araya³, Gabriel Easton¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Maule, Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Avenida San Miguel 3605, Talca, Chile

The Puerto Aldea Fault, located at the southern limit of the Challenger tectonic segment in the Coquimbo Region, is a structure that shows neotectonic activity, which has been accommodating part of the deformation undergone by the upper crust during the Quaternary. Although the fault presents a trace with an extension that could be up to ~70 km in length, it is a geological object that has been poorly studied. Recent microseismicity data provided by a local temporal network, which was operating for 7 months, show that cortical seismicity occurs in the study area (<25 km depth). This would indicate that the faults in this sector could be affected, in their seismic activity, by the deformation undergone by the continental crust since the Quaternary to the present. Thus, in this investigation the main objective is to determine how has been the seismic activity and kinematics of the Puerto Aldea Fault and neighboring faults and the relationship they would have with the surface geology.

Thereby, we will characterize subaerial and submarine geomorphological features that denote the Quaternary activity of crustal faults; we will identify the presence of seismically active faults and their geometry by analyzing the microseismicity present in the continental upper crust; and we will propose models of peak ground acceleration for the events triggered by the Puerto Aldea Fault and neighboring faults, with different proposed multi-case scenarios.

To accomplish these aims, the methodology consisted in the setting up of temporal seismological stations along the Puerto Aldea Fault, and the subsequent analysis of the data obtained and relocation through machine learning, to light up structures at depth. On the other hand, we performed seismic reflection profiles in the Tongoy Bay, which accounts for the possible submarine north extension of this fault. The mapping of geomorphological features, the cartography of faults through satellite images and the mapping of surface geology, in addition to the use of a drone as support, will be essential to recognize structures and surface deformation. With the results obtained, a three-dimensional structural model of the active faults at depth will be performed. Finally, it will be expected to evaluate in detail the seismic hazard of the Puerto Aldea Fault, which could have a great impact on different localities settled along the coast between La Serena and Tongoy urban areas.

Keywords: Active faults, microseismicity, structural geology, seismic hazard.

Testing the feasibility of a low-cost accelerometer network for real-time earthquake monitoring in the Valparaíso Region, Chile

Vaclav Kuna¹, Sebastián Riquelme², Rodrigo Sánchez²

(1) Institute of Geophysics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

(2) Universidad de Chile, Santiago, Chile

Our project aims to test the feasibility of a low-cost earthquake monitoring system in the Valparaíso Region, Chile. The system uses a network of low-cost seismometers, each equipped with a microcontroller board with a 3-component MEMS accelerometer. Sensors continuously monitor the ground motion and stream data to a cloud-based acquisition platform via Wi-Fi or cellular internet. The system processes the data streams in near-real time and automatically determines earthquake location, origin time, and magnitude within a few seconds after the earthquake's origin. It reports the event parameters together with information about the ground shaking intensity via a cell phone application. A test network of 10 instruments is being installed in Valparaíso Region, Chile in July 2023. Most stations are deployed in a dense grid (about 2 km apart from each other) within the Valparaíso metropolitan area. The aim is to test the real-time capability of the network in this environment, which includes testing the data transmission latency from the network to cloud servers and the reliability of station connectivity. The network is expected to record and automatically report on earthquakes of $M > 3.5$ and provide near real-time information on shaking intensity and site amplification. This technology is already being tested in central Nepal, where a network of 40 accelerometers monitors seismic activity since late 2021. In Nepal, the network has captured several tens of earthquakes and reported on those fast enough so that the information could have been potentially used as an Earthquake Early Warning system in the region. Other networks are under development in Haiti and Puerto Rico. The project in Valparaíso is part of a broader initiative to create a low-cost cloud-based platform for real-time seismic data acquisition and processing that could be used globally for various monitoring purposes. The deployment in Valparaíso should help to test the system, uncover possible improvements, and show its potential use in Chile.

Keywords: Earthquake hazard and risk, real-time seismic monitoring, accelerometer.

A data-driven Bayesian methodology to estimate 2D b-value variations

Catalina Morales-Yáñez¹, Roberto Benavente¹⁻², Phil Cummins³, Malcolm Sambridge³, Rhys Hawkins³

(1) Universidad Católica de la Santísima Concepción, Department of Civil Engineering, Concepción, Chile

(2) National Research Center for Integrated Natural Disaster Management (CIGIDEN), Santiago, Chile

(3) Research school of earth sciences, Australian National University, Canberra, Australia

The Gutenberg–Richter law relates the number of earthquakes with their magnitude, and the slope of this relation is known as the b-value. The spatial changes in the b-value in seismicity catalogs have been associated with different stress levels, fluid processes, and geological structures. Moreover, it has been shown that b-values can discriminate between foreshock and aftershock activity, and the temporal variation of b-values has been used for earthquake hazard estimation. Given this breadth of potential applications, it is essential to robustly retrieve and characterize b-values as well as their change points (i.e., the places where the b-value varies). In general, most of the methodologies to retrieve the b-value fix the spatio-temporal window of the seismic catalog (i.e., binning) and then use optimization methods to obtain the values. Recently, we have used a Bayesian trans dimensional approach to estimate b-value variations along one arbitrary dimension objectively. This implementation allows a self-defined seismic domain according to the seismic catalog information, which means that in contrast to earlier approaches, the location and extent of the domains are not imposed but instead determined by the data. This methodology has been implemented in one dimension in central-northern Chile, showing promising results (Morales-Yáñez et al., 2022). The solutions indicate the reliability of the Bayesian transdimensional method for capturing robust b-value variations, allowing us to characterize the mechanical behavior on the plate interface of subduction zones. Success in application to the 1D case lends encouragement to extension to higher dimensions.

In this study, we extend the approach to 2D applications. While, in principle, the dimensions are arbitrary (e.g., time, latitude, longitude, depth), we focus on obtaining 2D spatial b-values changes across the seismic region. For this, the TransTessellate2D algorithm is used (Hawkins et al., 2019). In particular, to explore the possible changes in the b-value along the space, the Trans-dimensional inference for 2D cartesian problems with Voronoi cells is employed. The synthetic tests were performed to analyze the spatial resolution of the methodology and the smallest b-value variation that the method can retrieve. The algorithm is then applied to the Californian seismicity catalog, with more than 100.000 events. The solutions are compared with previous studies of b-value variation in the region with intriguing results.

Keywords: b-value, Transdimensional Bayesian inversion, Gutenberg–Richter law, Earthquake catalog.

Financing: C. Morales-Yáñez acknowledges funding from ANID/FONDECYT 3220307.

References:

- Morales-Yáñez C., Bustamante L., Benavente R., Sippl C., and Moreno M. (2022). B-value variations in the Central Chile seismic gap assessed by a Bayesian transdimensional approach. *Sci Rep* 12, 21710. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25338-4>.
- Hawkins, R., Bodin, T., Sambridge, M., Choblet, G., & Husson, L. (2019). Trans-dimensional surface reconstruction with different classes of parameterization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 505– 529, <https://doi.org/10.1029/2018GC008022>.

Global search of short-term transient deformation using continuous GPS networks

Javier Ojeda¹⁻²⁻³, Jean-Mathieu Nocquet¹⁻⁴, Sergio Ruiz²

(1) Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(4) Université Côte d'Azur, Géoazur, Valbonne, France

GPS time series monitor coordinate changes through time. Changes in coordinates include a secular trend, seasonal variations, offsets and transient signals. One specific case of transient deformation process along tectonic faults corresponds to slow slip events (SSEs). The discovery of SSEs has led to several clues about their influence on the built-up stress along faults and how they can affect the seismic cycle since they have been observed during the interseismic periods, postseismic afterslip evolution, and prior to large earthquakes. However, the detection of these transient signals has proven to be challenging. In this study, we focus on the detection of short-term transients. We used worldwide continuous GPS data from the Nevada Geodetic Laboratory to explore such anomalous signals in the time series. We removed the coseismic caused by large earthquakes and outliers for the horizontal and vertical components of the time series. Afterwards, we employed a novel method to detect short-term transients using l1-trend filtering where GPS time series are modelled by piecewise linear functions. Following the l1-trend filter approximation, we search for an optimal filter parameter incorporating the Bayesian information criterion (BIC) and Akaike information criterion (AIC). This approach allows us to discretise the time series in optimal segments to compute the discrete-time derivative and retrieve "instantaneous" velocities. A further process considers correcting for common mode signals from the instantaneous velocities, using the stations placed on a radius of 300 km from each analysed site. We then quantify the transient intensity at each GPS site. We propose to use the fourth-largest instantaneous velocity from the norm of the horizontal components at each site as a proxy of transient displacement. Our approach finds that transients in the time series correlate to main tectonic features in active faults and volcanic systems. For instance, we detected the velocities of SSEs in subduction zones such as New Zealand, Costa Rica, or Ecuador, but also the relative motion of strike-slip faults such as Parkfield or San Jacinto in the United States and close to large calderas such as Mt St. Helens or Yellowstone. These observations demonstrate the potential uses of our method to systematically analyze large GPS arrays to search for transient deformation signatures. The further analysis considers the comparison with other microseismicity or tremor activity observations to discuss whether these transients correspond to SSEs that may interact with other activity like seismic swarms.

Keywords: GPS, transient deformation, slow slip events, global analysis, faulting and volcanoes

Financing: JO acknowledges support from the Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo scholarship ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2020-21200903. SR thanks ANID/FONDECYT project no. 1200779. We thank the Agence Nationale de la Recherche (ANR), S5 project: Synchronous Slow Slip & Seismic Swarm, grant ANR-19-CE31-0003-01.

Improving Northern Chile's earthquake catalog: Comparative analysis of phase associators

Jorge Antonio Puente Huerta¹⁻², Christian Sippl¹

(1) Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Prague

(2) Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Geophysics, Prague

The subduction plate margin of Northern Chile is a seismically highly active region, and its seismicity provides valuable insights into the interactions between the Earth's surface and its deep structure. Since late 2006, IPOC (Integrated Plate Boundary Observatory Chile) has maintained a permanent network of broadband stations there, closely monitoring the active plate margin. With a comprehensive earthquake catalog spanning the years 2007 to 2021, consisting of over 180,000 events, these extensive observations have significantly contributed to our understanding of subduction zone processes. In this study, focused on a one-year period, we aim to improve the completeness of the existing earthquake catalog by employing novel deep-learning-based methodologies. Current phase picking algorithms are capable of generating large phase datasets.

Previous studies have shown that the performance of the phase associator, i.e. the routine that links phase picks from different seismic stations to events, is crucial for improving catalog completeness. As part of project MILESTONE, which aims at the automatic creation of large micro seismicity catalogs in subduction zones, in the present study we performed a systematic comparison of various event associators, evaluating their performance using synthetic datasets. We then applied the most effective associator from the comparative analysis to real data from Northern Chile, comparing the results against the existing IPOC catalog. We demonstrate that we can achieve a significantly more complete seismic catalog for the study region. Such an enhanced dataset represents a valuable resource for statistical seismology (e.g. the analysis of b-values) and provides an opportunity to perform more detailed analysis of seismicity patterns and their temporal evolution, which are likely indicators for plate interface coupling state and potential slow slip events (for interplate seismicity) as well as intraslab stress field and mineral reactions (for intraplate seismicity).

Keywords: IPOC, Phase association, Subduction zone, Earthquake detection.

Towards a next-generation microseismicity catalog for Chile

Christian Sippl¹, Nooshin Najafipour¹⁻², Jorge Puente Huerta¹⁻², Nazia Hassan¹⁻², Bernd Schurr³

(1) Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

(2) Charles University Prague, Department of Geophysics, Faculty of Mathematics and Physics, Prague, Czech Republic

(3) German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany

Seismicity catalogs are an important ingredient for a vast number of research directions in subduction zones, such as the characterization of the plate interface, monitoring the activity of crustal fault systems or constraining the geometry of the downgoing slab. With the Chilean permanent seismic network having been widely extended since about 2014, the seismicity catalog routinely provided by the CSN has become a widely used and valuable resource. However, novel automated techniques based on deep learning approaches for phase picking as well as association now make it possible to produce a new generation of seismicity catalogs with significantly lower completeness magnitude, and thus many more small events. This allows for lower location uncertainties (as relative location methods grow more powerful with growing event numbers) as well as higher achievable resolution for studies such as statistical seismology (e.g. b-value analysis), seismic tomography or the temporal monitoring of activity patterns.

In this presentation, we will first show examples for the compilation and the usefulness of such a catalog for Northern Chile, mainly relying on data from the IPOC permanent network. As shown in published studies, the IPOC catalog allows defining the geometries as well as temporal activity patterns of all constituent parts of the Northern Chile margin in unprecedented resolution. It contains more than 180,000 events over a time span of 15 years, but we can show that this is far from the end of the line. In test runs with deep learning methods, employing EQTransformer for waveform picking and GaMMA for the association of picks to events, we retrieve a factor of 5 to 10 more events compared to the IPOC catalog when optimizing our parameter choices. This clearly highlights the potential of the large-scale application of such methods to multi-year permanent seismometer deployments. As our eventual plan is to extend this type of analysis to the entire Chilean margin, we will outline our steps working towards this goal, and discuss the potential as well as pitfalls of this endeavour.

Keywords: Seismicity catalog, Deep learning methods, Microseismicity.

Simulación estocástica del movimiento fuerte para el terremoto de Valparaíso (Chile) de 1985, Mw 8,0

Rogelio Torres¹⁻², Sergio Ruiz¹

(1) Universidad de Chile, Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Blanco Encalada #2002, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Blanco Encalada #2002, Santiago, Chile

En los últimos años, se han estudiado los grandes terremotos históricos ocurridos a lo largo de Chile con el objetivo de comprender el contexto sismotectónico y predecir el movimiento del suelo durante estos eventos sísmicos. El estudio de estos grandes terremotos y el análisis de sus registros sísmicos son fundamentales para mejorar nuestro conocimiento y comprensión del comportamiento de las estructuras frente a eventos sísmicos. Uno de los primeros terremotos de gran magnitud registrados con la "Global Digital Seismograph Network" (GDSN) tuvo lugar el 3 de marzo de 1985 frente a las costas de Valparaíso, alcanzando una magnitud de momento (Mw) de 8,0.

Diversos investigadores han modelado el comportamiento de la distribución de deslizamiento en la fuente sísmica, obteniendo resultados y ajustes aceptables en bajas frecuencias. Sin embargo, se ha observado una discrepancia entre estas áreas de máximo deslizamiento y las aceleraciones registradas en el campo cercano.

En este estudio, se utilizó el código propuesto por Ruiz y Otárola (2016) para generar de forma estocástica acelerogramas sintéticos que sean capaces de reproducir con precisión las aceleraciones observadas durante el movimiento del suelo en campo cercano. Este enfoque permite simular de manera realista las características del terremoto, brindando una herramienta valiosa para comprender y evaluar el impacto de los eventos sísmicos en diferentes áreas y estructuras.

El modelo de fuente propuesto se compone de distintas áreas principales de ruptura, empleando la metodología de "strong motion generation areas" (SMGA), la cual, se desarrolló mediante un enfoque de ensayo y error.

Los resultados obtenidos a través de la generación de acelerogramas sintéticos logran reproducir tanto la forma espectral como la temporal del terremoto, en concordancia con los registros proporcionados por la red del Centro Sismológico Nacional (CSN). Estas simulaciones estocásticas del terremoto fuerte se llevaron a cabo en condiciones de roca y áreas con un marcado efecto de sitio.

Palabras Clave: Sismología, terremotos fuertes, simulación estocástica, Valparaíso 1985, Acelerogramas sintéticos.

Agradecimientos: Beca doctoral ANID.

Referencias:

- Otárola, C., & Ruiz, S. (2016). Stochastic generation of accelerograms for subduction earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(6), 2511-2520.

Inteligencia artificial en el monitoreo sísmico volcánico en tiempo real implementado en Ovdas – Chile

Oscar Alberto Valderrama Cayuman¹, Sergio Morales Méndez¹

(1) Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, RNVV, SERNAGEOMIN, Temuco, Chile

En la actualidad el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur -OVDAS del Servicio Nacional de Geología y Minería – SERNAGEOMIN realiza la vigilancia en tiempo real de los 45 volcanes de mayor riesgo específico del país (SERNAGEOMIN, 2020). Como línea base de este monitoreo se encuentra el seguimiento de la actividad sísmica por medio de la cual se pueden inferir diferentes tipos de procesos que ocurren en los volcanes (Lahr et al., 1994, Chouet y Matoza, 2013). Actualmente en OVDAS la labor de identificación y clasificación es un proceso que se realiza de forma manual y de manera constante durante las 24 horas del día, clasificándose mensualmente entre 10 mil y 20 mil señales sísmicas de diferentes tipos lo cual conlleva una alta carga de trabajo y es especialmente crítico en periodos de incrementos de actividad en un volcán, en donde se necesita procesar un alto volumen de datos en poco tiempo con el fin de realizar la evaluación de la actividad del volcán.

Con el objetivo de mejorar los tiempos de procesamiento y análisis de la actividad sísmica desarrollamos un sistema de identificación y clasificación automática de señales sísmicas volcánicas en lenguaje Python, mediante el cual se realiza la identificación de 5 tipos principales de señales sísmicas: Largo Periodo (LP), Tremor (TR), Volcano Tectónicos (VTs), Avalanchas (AV) y eventos Tectónicos (TL).

El sistema está compuesto por tres etapas principales: segmentación de las señales, clasificación y caracterización. Para la etapa de segmentación desarrollamos un sistema basado en la forma de onda de las señales, en donde mediante la utilización de una o más estaciones se identifican los potenciales eventos sísmicos. En la etapa de clasificación utilizamos Machine Learning mediante un clasificador tipo Random Forest el cual utiliza características de la forma de onda y del espectro de frecuencias como datos de entrada. Finalmente, en la etapa de caracterización se extraen las características principales para cada tipo de evento como amplitud, frecuencia dominante, desplazamiento reducido entre otras. También en esta etapa de caracterización implementamos el algoritmo PhaseNet, (Zhu y Beroza, 2019) el cual identifica los tiempos de arribo de ondas P y S, información con lo cual se realiza la localización automática de señales, principalmente del tipo Volcano Tectónico.

El sistema de clasificación fue entrenado con 700 sismos de cada tipo registrados en el C.V. Nevados de Chillán, a partir de lo cual se realizó la evaluación del periodo eruptivo 2017 – 2022, en el cual se registró periodos de actividad tanto efusivos como explosivos, los cuales se enmarcaron en cinco fases principales desde predominancia hidrotermal hasta diferentes tipos de episodios magmáticos incluidos la extrusión de domos de lava (Cardona, Gil-Cruz, Franco et al., 2021) generando múltiples tipos de señales sísmicas de los diferentes tipos analizados. Como resultado del proceso se han obtenido, de manera inicial, resultados sobre el 85% de efectividad en comparación con la clasificación manual al comparar el periodo 2017 - 2022 del C.V. Nevados de Chillán. Finalmente, este mismo modelo, entrenado con datos del C.V. Nevados de Chillán, está siendo aplicado a los 45 volcanes monitoreados por OVDAS logrando prometedores resultados preliminares.

Palabras Clave: Machine Learning, Sismicidad, Random Forest Classifier, Real Time, Automático.

Referencias:

- Cardona, C., Gil-Cruz, F., Franco-Marín, L., San Martín, J., Valderrama, O., Lazo, J., C. Cartes, S. Morales, E. Hernández, J. Quijada, C. Pinto, M. Vidal, C. Bravo, G. Pedreros, M. Contreras, M. Figueroa, L. Córdova, C. Mardones, A. Alarcón, G. Velásquez., Bucarey, C. (2021). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex – Chilean Andes (2012 to 2020). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Chouet, B., & Matoza, R. (2013). A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 252, 108-175.
- Lahr, J. Chouet, B., Stephens, C., Power, J., & Page, R. (1994). Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137-151.
- SERNAGEOMIN. (2020). Ranking volcánico de Riesgo Específico versión 2020. <https://rnvv.sernageomin.cl>.
- Zhu, W., & Beroza, G. (2019). PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*, 261-273.

Capacidad de almacenamiento de CO₂ en el subsuelo del bloque Manzano, Región de Magallanes, Chile

Álvaro Pérez Pérez¹, Danilo González Faletto¹

(1) Empresa Nacional del Petróleo, Depto. de Estudios de Exploración, JOSÉ NOGUEIRA 1101, Punta Arenas, Chile

La captación y el almacenamiento de CO₂ (CAC) en formaciones geológicas, es una técnica emergente que consiste en capturar los residuos de este gas procedentes de fuentes industriales, transportarlo a un sitio de almacenamiento y luego inyectarlo en el subsuelo, de manera que el CO₂ no retorne a la atmósfera durante un período geológicamente significativo. Su implementación podría disminuir nuestras emisiones a corto y mediano plazo (Metz et al., 2005) ayudando a cumplir las metas establecidas por el estado de Chile en la ley Marco de Cambio Climático promulgada en junio de 2022. Esta técnica se utiliza en otros lugares del mundo (Ajayi et al., 2019) y emplea tecnologías desarrolladas por la industria del petróleo para otros propósitos, las cuales han sido ocupadas por ENAP desde hace varias décadas.

Este trabajo presenta una caracterización y cuantificación preliminar de la capacidad de almacenamiento de CO₂ en un área de 2180 km², ubicada 20 km al norte de Punta Arenas, cercana al área portuaria industrial más importante de la región y sobre el relleno sedimentario que conforma la Cuenca de Magallanes. La estratigrafía del lugar se conoce gracias a las decenas de pozos que han llegado a investigar hasta casi 5 km de la columna sedimentaria. Utilizando la información obtenida en estos sondeos se ha podido simular el comportamiento del CO₂ en subsuperficie y se ha determinado que éste alcanzaría un estado supercrítico, considerado el óptimo para la inyección en el subsuelo (Bachu, 2000), a más de 750 m de profundidad. Además, por debajo de 1500 m de profundidad las rocas se encuentran sobre-presionadas lo cual constituiría un límite inferior para la selección de sitios adecuados. Considerando lo anterior, se identificaron dos tipos de sumideros: acuíferos salinos y mantos de carbón, ambos con las características básicas para retener el CO₂ por el tiempo necesario; a saber, porosidad, permeabilidad y sello.

Los acuíferos salinos idóneos para la inyección de CO₂ se extienden por toda el área de estudio, son niveles arenosos que forman parte de un paquete progradante que puede superar los 1000 m de espesor y pertenecen a la Formación Loreto, de edad Eoceno Superior. El espesor neto de arena en los pozos es del orden de los 200 m, mientras que la porosidad de las areniscas promedia 19%. En la mayoría de los niveles arenosos el espacio de poro está saturado completamente con agua, sin embargo, algunos niveles poseen hasta 60% de saturación de hidrocarburos. El principal mecanismo de atrapamiento de CO₂ en estos sitios ocurre mediante su inyección que provoca el desplazamiento del agua que ocupa los poros hasta alojarse en las partes altas de las trampas. Asimismo, una menor cantidad de CO₂ quedará en el camino atrapada entre la porosidad. Con el tiempo, parte del CO₂ comenzará a disolverse en el agua, aumentará la densidad de ésta y se hundirá hasta la base de la capa porosa. Finalmente, una fracción menor del CO₂ reaccionará con la roca formando nuevos minerales que precipitarán en el espacio de poro (Shukla y Vishal, 2016).

Los mantos de carbón adecuados para convertirse en sumideros de CO₂ son parte de las formaciones Loreto y El Salto. Los carbones eocenos de Loreto tienen mayor rango, menor espesor individual de los mantos, mayor contenido medido de gas natural y se emplazan a mayor profundidad que los carbones miocenos de El Salto. Ambos niveles son buenos candidatos como sumideros de CO₂, pero los carbones del Eoceno podrían además ser explotados como reservorios de gas natural mientras secuestran CO₂. En los carbones, el CO₂ desplaza al CH₄ que está adherido a las paredes de los poros y se fija a ellas a través de fuerzas adhesivas manteniéndose dentro del carbón, aunque no exista roca que selle la trampa. Una menor cantidad de CO₂ se mantendrá en el agua que inunda el centro de los poros y "cleats", disolviéndose con el tiempo, y una porción aún menor será absorbida por la estructura maceral de la roca (Moore, 2012).

Siendo esta una evaluación prospectiva del espacio total disponible, que disminuirá a medida que se adquiera más información, se estima que los acuíferos salinos podrían almacenar más de 900 millones de toneladas de CO₂ y los mantos de carbón más de 58 millones de toneladas de CO₂. Estas cifras son relevantes, puesto que el año 2018, debido a la generación de energía, a nivel nacional se produjeron del orden de 80 millones de toneladas de CO₂ (Cáceres y Guzmán, 2020). No obstante, esta evaluación está lejos de dimensionar el potencial completo de la Cuenca de Magallanes: de mucho mayor extensión y con variadas posibilidades de almacenamiento no evaluadas hasta el momento, que incluyen yacimientos agotados de hidrocarburos.

Palabras Clave: Dióxido de Carbono, Almacenamiento geológico, Cuenca de Magallanes, Gas Metano de Carbones.

Agradecimientos: Los autores agradecemos a las gerencias de ENAP Magallanes por permitir la publicación de este trabajo y brindar su invaluable apoyo otorgando el tiempo y los recursos necesario para su realización.

Referencias:

- Ajayi, T., Gomes, J.S. y Bera, A. 2019. A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Pet. Sci.* 16, 1028–1063.
- Bachu S. 2000. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*. v. 41(9), p. 953-970.
- Cáceres, S. & Guzmán, R. 2020. Sector energía. In Martínez, R. (autor principal): Informe del inventario Nacional de Chile 2020: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos (1990-2018). Ministerio de medio Ambiente; Sistema de Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero. 534 pp.
- Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M. y Meyer L. (ed) 2005. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, OMM, PNUMA.
- Moore, T. 2012. Coalbed methane: A review. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 101: 36-81.
- Shukla R., y Vishal V., 2016. "Trapping Mechanism of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers: Brief Review." In *Geologic Carbon Sequestration*, 47–58. Cham: Springer International Publishing, 2016.

Captura de datos y mapas webs: Innovación SIG de la Unidad de Geoquímica de Sernageomin

Pablo Oliva Vicentelo¹, Jorge León Gamboa², Hugo Neira Santander², Juan Pablo Lacassie Reyes³, Felipe Astudillo Wells³, Rafael Mardones Parada⁴, Alina Gárate Vergara⁵

- (1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Av Luis Beretta Porcel 2964, Arica, Chile
(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geomática, Unidad de Sistemas de Información Geológicos, Teatinos 50 Piso 8, Santiago, Chile
(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Aníbal Pinto 2031, Valdivia, Chile
(4) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Av. Santa María 104 Piso 7, Santiago, Chile
(5) AmigoCloud Inc., 4730 University Way NE, Suite 104 (PMB 25830), Seattle, USA

El Programa de Geoquímica del Plan Nacional de Geología (PNG), es uno de los tres programas específicos del PNG, cuyo objetivo es levantar, analizar e interpretar información de geoquímica de suelos y sedimentos del territorio nacional, generando información prospectiva y de línea de base, la cual se publica a través de mapas, bases de datos geoquímicos e informes registrados

Históricamente, los Mapas Geoquímicos realizados por la Unidad de Geoquímica (UGQ), corresponde a un producto que está constituido por un texto y un mapa en formato pdf interactivo, que se entregan al usuario final en formato digital. Para el desarrollo de estos mapas, se ha utilizado el software Adobe Illustrator, que permite exportar la información en este tipo de formato (pdf interactivo).

Este trabajo presenta el nuevo formato de los Mapas Geoquímicos que se espera desarrollar en la UGQ además del flujo de trabajo, la estructura de datos y su implementación. Esto permitirá cambiar el formato de pdf interactivo, por un mapa web publicado en ArcGIS online. Por lo tanto, implicaría una mejora sustantiva en las publicaciones regulares del programa de geoquímica.

El formato del mapa web genera inmediatamente contenido para la plataforma institucional (Visores Sernageomin) y democratiza el acceso a la información, pues, un usuario solo requiere tener un navegador de internet (móvil o de pc) para poder acceder al contenido del mapa y sus atributos. Asimismo, podría acceder desde cualquier ubicación geográfica. Adicionalmente, quedará elaborado el producto SIG para usuarios más avanzados (proyecto mxd, las coberturas geoquímicas, etc.) que requieran trabajar con la información en sus propios proyectos.

Las principales características de este nuevo formato son las siguientes: i) Se pueden prender y apagar lo que permite realizar un análisis espacial entre ellas, ii) Presenta widgets, que corresponden a botones o funcionalidades que permiten realizar distintas funciones dentro del mapa como generar gráficos de elementos con carácter ambiental o prospectivo, búsqueda, impresión, intercambio de mapas bases) iii) Genera vínculos a sitios donde se puede acceder a mayor contenido del producto. Es por lo tanto un mapa dinámico y mucho más interactivo que el formato de publicaciones anterior.

De la misma manera, la Unidad de Geoquímica (UGQ) de Sernageomin, implementó la toma de datos de terreno a través de Smartphones, posibilitando no sólo la toma del dato, sino también el sincronizar la información de manera online.

Para esto se diseñó una estructura de base de datos relacional que implementó utilizando el software AmigoCloud. Cada recolector de datos tiene en su dispositivo móvil un formulario amigable que fue diseñado a partir de esta estructura, lo que le permite capturar los datos o atributos de la muestra, del punto de muestreo, así como también adjuntar fotografías. Esta información se sincroniza de manera inmediata en la plataforma web de la aplicación AmigoCloud.

Finalmente, en este trabajo se presenta el Mapa Geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena como mapa piloto y que puede ser consultado en el siguiente vínculo:

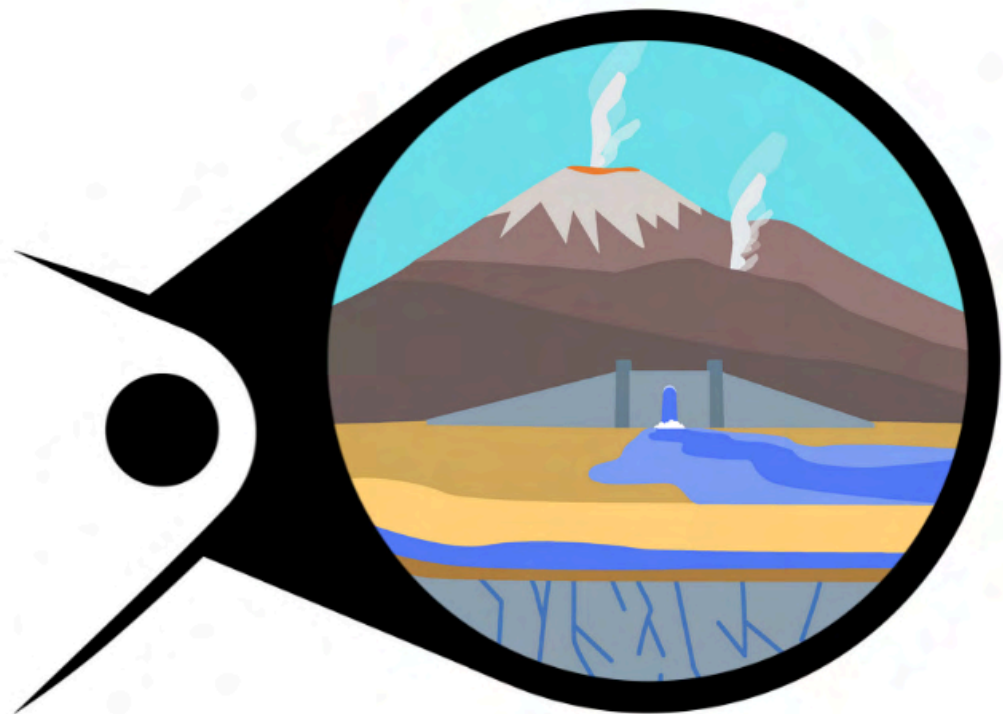
<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=0d78cbdf056b460a9e39b4981574b96d>.

Además, se presenta el flujo de trabajo, diseño e implementación de la aplicación de AmigoCloud en los procedimientos y protocolos de muestreo de la UGQ.

Palabras Clave: Smartphones, Muestreo geoquímico, Mapa Web, PNG, Cloud Computing.

Financiamiento: Plan Nacional de Geología - Servicio Nacional de Geología y Minería.

ÁREA TEMÁTICA 3: RECURSOS HÍDRICOS Y ENERGÉTICOS



Profundidades de basamento y caracterización hidrogeológica del acuífero del valle del río Itata bajo. Región de Ñuble, Chile

Igor Aguirre¹, Fabien Salgado¹, Carlos Espinoza¹, Carolina de la Maza¹, Felipe Cerda¹, Héctor Flores²

(1) Subterránea Consultores, Santiago, Chile

(2) Dirección General de Aguas Región de Ñuble, Vega de Saldías N° 651, Chillán, Chillán, Chile

El presente estudio licitado por la DGA y denominado ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO ITATA, ESTUDIO GEOFÍSICO ITATA BAJO fue ejecutado por Subterránea Consultores con mediciones geofísicas mediante los métodos de Transiente Electromagnético (TEM) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) durante el verano de 2022-2023. Con ello se realizaron un total de 74 mediciones de TEM y 20.300 m de mediciones ERT conformando diferentes perfiles de resistividad. Lo anterior permitió definir la presencia de unidades geoelectricas (A, B1, B2, AB, BD, BD*, BC y D) las que a su vez son interpretadas desde el punto de vista hidrogeológico y litológico mediante una serie de secciones representativas.

Las unidades de mayor importancia hidrogeológica se pueden relacionar con las unidades geoelectricas B1, AB y B2 por contener el acuífero. La unidad A asociada a niveles superficiales, se interpretó como sedimentos o suelo con contenidos de humedad variables. La unidad D corresponde al basamento impermeable asociado esencialmente a rocas ígneas. Este basamento, hacia los sectores costeros se caracterizó como unidad BD donde predominan rocas metamórficas y en determinados sectores al presentar resistividades moderadas a bajas fue caracterizada como unidad BD* lo que se interpretó como roca metamórfica con un mayor grado de alteración e influencia salina.

En este estudio se presenta una modelación de las profundidades y elevaciones de basamento del valle del río Itata bajo resultante del procesamiento de profundidades de basamento de este estudio y de la compilación de antecedentes geofísicos y de pozos. Como resultado de lo anterior, se determina que las mayores profundidades de basamento se encuentran localizadas hacia los extremos suroriental y noroccidental del área de estudio, en sitios específicos localizados en torno a las localidades de Ñipas y Coelemu, y también hacia aguas abajo de Trehuaco con profundidad de basamento que pueden alcanzar valores en torno a los 150-200 m.

Se recomienda complementar o robustecer la interpretación hidrogeológica aquí propuesta con antecedentes estratigráficos e hidrogeológicos a partir de información de pozos y nuevas perforaciones, particularmente en el sector costero, 56 explorando las rocas metamórficas en profundidad y en la zona de cabeceras del área de estudio, en la Formación Mininco y sector Confluencia. Por otro lado, en los sitios donde existen vacíos de información, se recomienda complementar las investigaciones geofísicas con nuevos levantamientos.

Palabras Clave: TEM ERT Basamento, Acuífero Itata Bajo.

Financiamiento: Proyecto licitado por DGA, realizado por Subterránea Consultores.

Agradecimientos: Agradecemos a DGA Ñuble, Subterránea Consultores sus trabajadores y todos quienes contribuyeron al éxito de este trabajo.

Geología y evolución de la cuenca del río Silala, norte de Chile: estudios geológicos y geofísicos

Edmundo Polanco Valenzuela¹, **Nicolás Blanco Pavez¹**, Cecilia Donoso¹, Jorge Vivallos Cañuta¹, José Escribano¹, Rita De la Cruz¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

El año 2016 Chile demanda a Bolivia ante la Corte Internacional de Justicia (CIJ) de La Haya por el uso, naturaleza y origen de las aguas del río Silala. Este hecho y, a solicitud de la Dirección de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL) del Ministerio de Relaciones Exteriores, solicitó al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) realizar estudios geológicos y geofísicos conducentes a determinar la estratigrafía, estructura y caracterización geofísica del subsuelo, para aportar las evidencias científicas sobre el origen y evolución geológica de la cuenca del río Silala. El 1 de diciembre de 2022, el CIJ resolvió la disputa entre ambas naciones, sentencia que resultó favorable a los argumentos técnicos presentados por Chile, esto es, las aguas del río Silala constituyen un curso internacional y, por lo tanto, se rige por las normas en derecho internacional sobre recursos hídricos transfronterizos compartidos. En este contexto, la presente contribución corresponde a una síntesis de la geología y evolución de la cuenca del río Silala. El levantamiento geológico se extendió de manera intermitente a lo largo de 6 años, iniciado con un mapeo de superficie donde, además, se recolectaron muestras de roca para la elaboración de cortes transparentes (8), análisis químicos (1) y dataciones radiométricas (Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México de Querétaro y Laboratorio de Geología Isotópica de SERNAGEOMIN; Tabla 1). Se realizaron 9 perfiles geológicos de detalle ajustados con la recolección de datos mediante perfiles de gravimetría y transiente electromagnético (TEM), para determinar espesores de unidades estratigráficas como insumo para un modelo hidrogeológico 3D. Adicionalmente, se mapeó un testigo de sondaje de ca. 117 m que se perforó a escasos metros de la frontera, con el objeto de apoyar la estratigrafía determinada en superficie. Todo lo anterior, permitió elaborar un modelo geológico consistente con la información levantada. Finalmente, destaca la arista político-estratégica dado que este estudio geológico-geofísico sirvió de fundamento técnico para el proceso de demanda del Estado de Chile.

La cuenca del río Silala se localiza a unos 96 km al noreste de la ciudad de Calama en el Altiplano de la Región de Antofagasta, en la frontera con el Estado Plurinacional de Bolivia. El río nace desde dos manantiales principales (quebradas Cajones y Orientales), situados a unos 1,3 y 3,6 km de la línea fronteriza, respectivamente y, drena hacia el oeste siguiendo la pendiente topográfica en una dirección NE-SO. Se extiende unos 7 km en el lado chileno, entre los volcanes Inacaliri y Apagado hasta desembocar en el río Inacaliri que es afluente del río San Pedro que a su vez desemboca en el río Loa.

Estratigrafía de la cuenca del río Silala

La estratigrafía de la cuenca del río Silala está sintetizada en la columna estratigráfica integrada (Figura 1) y sustentada en edades radiométricas (Tabla 1).

Tabla 1. Edades radiométricas de la cuenca del río Silala (SERNAGEOMIN, 2017, 2019; Blanco y Polanco, 2018). * Corresponden a edades disponibles en las Hojas bolivianas 1:250.000 Volcán Juriques y Volcán Ollagüe (Ríos et al., 1997; Almendras et al., 2002, respectivamente). ** Edad publicada en la Carta Inacaliri 1:100.000 de Sellés y Gardeweg (2017). MF: masa fundamental y RT: roca total.

Muestra	UTM N	UTM E	Tipo	Material	Edad (Ma)	Error	Unidad
No inf.	7.567.382	601.593	K-Ar	Biotita	*1,48	0,02	Colada de lava de Inacaliri
AL-197	7.566.976	594.878	Ar/Ar	MF	**1,612	0,018	Secuencia volcánica del Pleistoceno Superior
RSP-16d	7.563.146	595.801	Ar/Ar	Plg	1,61	0,08	Ignimbrita Silala
No inf.	7.563.879	603.663	K-Ar	Biotita	*1,74	0,02	Colada de lava del Cerro Negro
RSP-13D	7.563.561	596.648	K-Ar	RT	2,6	0,4	Secuencia volcánica del Plioceno
RSP-14D	7.563.554	596.534	U-Pb	Circón	4,12	0,08	Ignimbrita Cabana
RSP-50d	7.563.302	600.110	U-Pb	Circón	6,63	0,06	Secuencia volcánica del Mioceno Superior

Secuencia volcánica del Mioceno Superior Msvd

La unidad más antigua definida corresponde una secuencia volcánica constituida principalmente por domos y coladas de lava de composición dacítica y textura porfírica de grano grueso con cristales de plagioclasa-anfíbola-óxidos de Fe-Ti, asignadas al Mioceno Superior (Msvd), en base a edades radiométricas de ca. 6,6 y 5,8 Ma (SERNAGEOMIN, 2017 y Almendras *et al.*, 2002; respectivamente; Tabla 1; Figura 1) que se exponen a lo largo de la frontera que conforman el zócalo de los volcanes Inacaliri y Apagado y, constituyen una barrera topográfica natural que canalizaron las corrientes de densidad piroclástica de eventos más jóvenes que provienen desde el este.

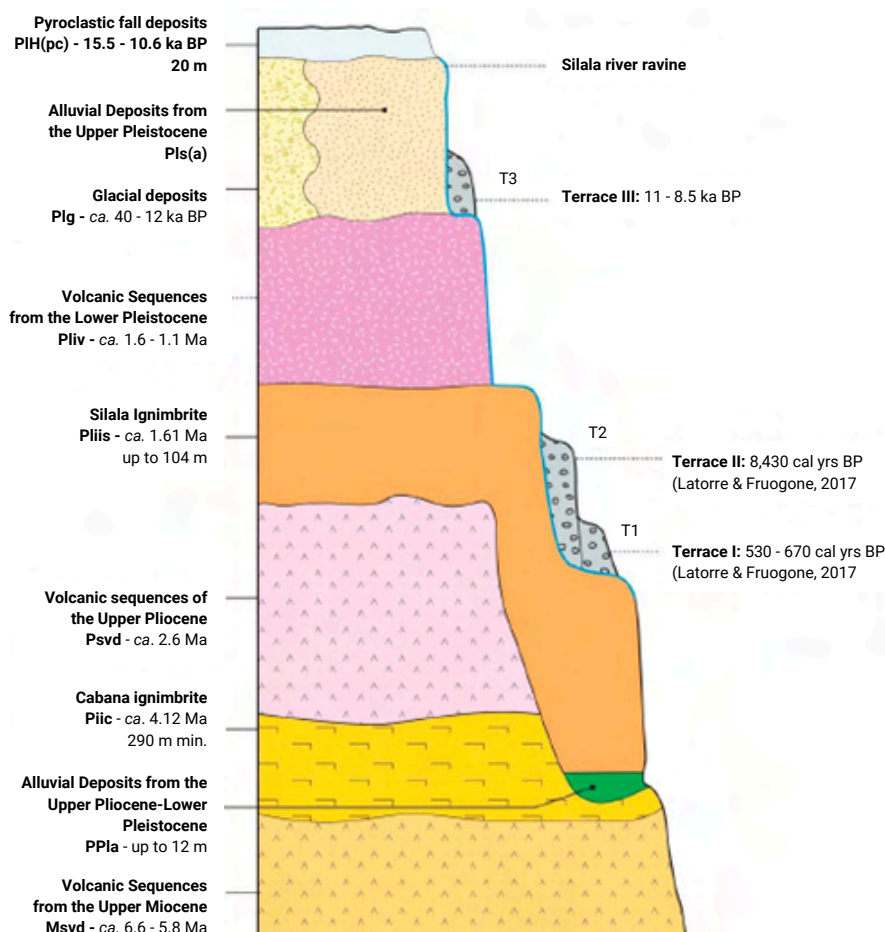


Figura 1: Columna estratigráfica general integrada de la cuenca del río Silala (SERNAGEOMIN, 2017; SERNAGEOMIN, 2019)

Ignimbrita Cabana Piic

En discordancia de erosión sobre la unidad anterior, se expone la Ignimbrita Cabana (Piic) de ca. 4,12 Ma (U-Pb en circón; SERNAGEOMIN, 2017, 2019; Tabla 1) la cual se exhibe levemente inclinada hacia oeste y se caracteriza por ser una toba pobre a medianamente soldada de color blanco y blanco rosáceo de pómez dacítica (biotita y anfíbola en vidrio color pardo oscuro de texturas intersertal y esperulítica típica de desvitrificación) y líticos angulosos a subangulosos inmersos en una abundante matriz de ceniza y cristales (plagioclasa-biotita-anfíbola-óxidos de Fe-Ti±clinopiroxeno), cuyo espesor mínimo expuesto es ca. 300 m.

Secuencia volcánica del Plioceno Superior Psvd

La Secuencia de volcánica del Plioceno Superior corresponde a coladas de lava de color gris pálido que cubren concordantemente a la Ignimbrita Cabana y está conformada por dacitas porfíricas de anfíbola y biotita y, escaso piroxeno, datadas en $2,6 \pm 0,4$ Ma (K-Ar en roca total; SERNAGEOMIN, 2017, 2019; Tabla 1). Al microscopio además se reconoce cuarzo con textura de embahiamiento y óxidos de Fe-Ti inmersos en una masa fundamental de textura intersertal de microlitos de plagioclasa y microcristales de clinopiroxeno y gránulos de óxidos de Fe-Ti y, vidrio color amarillento a incoloro intersticial. Los fenocristales de anfíbola y biotita tienen distintos grados de oxidados hasta completamente opacos.

El contacto entre la Ignimbrita Cabana y coladas de lava del Plioceno Superior se encuentra inclinado 11° hacia al E, inclinación que se atribuye a una falla inversa inferida (Falla Cabana), vergente al oeste, en respuesta a una compresión oeste-este ocurrida entre ca. 2,6 y 1,6 Ma. A la Falla Cabana acompañan fallas normales que acomodan el acortamiento y alzamiento del bloque colgante.

Depósitos aluviales del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior PPIa

Unidad sedimentaria aluvial depositada en discordancia angular y erosiva sobre rocas de la Ignimbrita Cabana y Secuencia volcánica del Plioceno Superior (Psvd) y, concordante bajo la Ignimbrita Silala. Corresponde a arenisca tuftítica gruesa, conglomerado finos de cantos rodados, arenisca gruesa con laminación cruzada en artesa que indican paleo-flujos hacia el suroeste y SSO, y brecha sedimentaria gruesa matriz soportada. Su espesor varía de 0,2-12,6 m y su posición estratigráfica indica depositación entre ca. 2,6 y 1,6 Ma (Tabla 1).

Ignimbrita Silala Pliis

La Ignimbrita Silala (Pliis) cubre en discordancia angular a rocas de la Secuencia Volcánica del Plioceno Superior. Corresponde a toba soldada de color rosado a rojizo con bloques de escorias andesíticas de piroxeno inmersos en una matriz cinerítica de color rojizo y negro. Constituye al menos tres unidades de flujo y una sola unidad de enfriamiento y, su espesor varía entre 20-104 m, y se adelgazada hacia el oeste, por lo que se infiere que la fuente se encuentra en territorio boliviano. Exhibe en la parte superior fracturamiento columnar típico de enfriamiento rápido. Se obtuvo una edad de $1,61 \pm 0,08$ Ma (Ar/Ar en plagioclasa; SERNAGEOMIN, 2017, 2019; Tabla 1). Conforman las paredes del cajón del río Silala en el lado chileno que ha sido labrado durante los últimos 11 ka (Latorre y Frugone, 2017). Las escorias son vesiculares (40% en volumen) con abundantes fenocristales de plagioclasa y piroxeno y, óxidos de Fe-Ti en una masa fundamental vítrea de textura intersertal de color pardo amarillento a rojizo.

Secuencia volcánica del Pleistoceno Inferior Pliv

La Secuencia Volcánica del Pleistoceno Inferior (Pliv) corresponde a los estratovolcanes Inacaliri y Apagado y, coladas de lava andesíticas y dacíticas y, domos dacíticos muy bien preservados (Sellés y Gardeweg, 2017). Las rocas de esta unidad son cubiertas parcialmente por depósitos glaciales de ca. 40-12 ka AP (Figura 1) que se preservan en las partes altas de ambos volcanes. Un flujo de lava que baja del volcán Inacaliri por el flanco este del lado boliviano rellena parcialmente la depresión de los manantiales del río Silala (bofedales Los Orientales) y cubre en parte a la Ignimbrita Silala. En este flujo de lava se obtuvo una edad de $1,48 \pm 0,02$ Ma (K-Ar en biotita; Almendras *et al.*, 2002). Además, en la pendiente sur se obtuvo una edad $1,612 \pm 0,018$ Ma (Ar/Ar en masa fundamental; Sellés y Gardeweg, 2017).

Depósitos piroclásticos de caída PIH(pc)

Los depósitos piroclásticos de caída de pómez y escorias (PIH(pc)) son bien estratificados y seleccionados (ceniza fina a media) de color gris oscuro intercalada con delgadas capas de color claro que se exponen parcialmente en la parte central sur del área. Su posición estratigráfica permite relacionarla a depósitos similares eyectados de los volcanes San Pedro y San Pablo con edades de 15,5-10,6 ka AP (Sellés y Gardeweg 2017; Bertin y Amigo, 2019) y constituye, por lo tanto, el último registro de actividad volcánica en la evolución de la cuenca del río Silala. Las pómezes son vesiculares (30% en volumen) con fragmentos de plagioclasa y Fe-Ti oxides y escasos fenocristales de biotita en abundante vidrio de color pardo oscuro a pálido de textura fibrosa.

Evolución del río Silala

Las primeras evidencias de drenaje aluvial asociado al sistema del río Silala corresponden a los depósitos aluviales del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior (PPIa; ca. 2,6-1,6 Ma), cuyas direcciones de paleoflujo se dirigen hacia el suroeste y SSO. Estos depósitos constituyen un horizonte altamente permeable, confinado entre las ignimbritas Cabana y Silala y conforman la roca huésped del principal acuífero regional de la cuenca, aunque uno más superficial se hospeda en los Depósitos aluviales del Pleistoceno Superior (Plsa; Figura 1). La segunda etapa en la evolución del sistema fluvial se produjo a finales del Pleistoceno Superior-Holoceno inferior (ca. 11-8,5 ka AP; Latorre y Frugone, 2017), donde se inicia la erosión e incisión del actual cajón del río labrado en la Ignimbrita del Silala (Figura 1), proceso que registra al menos dos etapas durante el Holoceno (ca. 8.430 y 670-530 años AP; Latorre y Frugone, 2017).

Palabras Clave: Evolución geológica, cuenca del río Silala, volcanoesstratigrafía.

Financiamiento: Este trabajo es el resultado de un convenio de colaboración entre DIFROL-SERNAGEOMIN.

Agradecimientos: Esta contribución cuenta con el patrocinio de la Subdirección Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Referencias:

- Almendras, A. O., Balderrama, Z. B., Menacho, L. M., Quezada, C. G., 2002. Mapa geológico hoja Volcán Ollagüe, escala 1:250.000. Mapas Temáticos de Recursos Minerales de Bolivia. SERNAGEOMIN.
- Bertin, D., Amigo, A. 2019. Geología del volcán San Pedro, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 201, 71 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Blanco, N., and Polanco E., 2018. Geology of the Silala River Basin, Northern Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Informe Registrado IR-18-70, Santiago.
- Latorre, C. Frugone, M. 2017. Holocene sedimentary history of the Río Silala (Antofagasta Region, Chile). Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Ríos, H., Baldellón, E., Mobarec, R., Aparicio, H., 1997. Mapa Geológico Hojas Volcán Inacaliri y Cerro Zapaleri, escala 1:250.000. Mapas Temáticos de Recursos Minerales de Bolivia, SGM Serie II-MTB-15B. SERNAGEOMIN.
- Sellés, D., Gardeweg, M., 2017. Geología del área Ascotán-Cerro Inacaliri, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 190, 73 p., 1 mapa, escala 1:100.000. Santiago.
- SERNAGEOMIN, 2017. Geology of the Silala River Basin. (Chile's Memorial, Vol. 5, Annex VIII, 279-433). I.C.J. Pleadings, Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia).
- SERNAGEOMIN 2019. Geology of the Silala River Basin: An Updated Interpretation (Chile's Reply, Vol. 3, Annex XIV, pp. 187-271). I.C.J. Pleadings, Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia).

Análisis hidrogeológico de las cuencas Quebrada de Paipote y Salar de Maricunga, en el territorio de la comunidad Colla El Bolo, Atacama: Evaluación de una potencial interconexión de cuencas

Alejandro Bordeu Ossa¹, Kimberlyn Demierres¹, Linda Daniele², Mariana Cervetto³, Carolina Guzmán⁴

(1) Departamento de Geología, FCFM, Universidad de Chile

(2) Departamento de Geología-CEGA-CAPTA, FCFM, Universidad de Chile

(3) HGA

(4) Independiente

Este estudio analiza el sistema hidrogeológico que afecta al territorio indígena de la comunidad Colla El Bolo, ubicada entre los sectores altos de la cuenca Quebrada de Paipote y de la cuenca Salar de Maricunga, en Chile. Estas cuencas se encuentran delimitadas entre sí por la Franja de Maricunga, que corresponde a un lineamiento de volcanes inactivos asociados al Sistema de Fallas Domeyko. La Franja de Maricunga ha sido considerada como una barrera hidrológica entre las cuencas estudiadas, por lo que se ha tratado a la cuenca Salar de Maricunga hidrológicamente cerrada para cualquier efecto de evaluación ambiental en el sector, aunque diversos autores han planteado que el no considerar los aportes a cuencas laterales podría traer consecuencias negativas en la gestión hídrica. Ante la rápida aparición de proyectos mineros de litio en el área, y consecuente explotación acuífera, la comunidad ha llevado a cabo sus propios estudios para aclarar los posibles impactos ambientales que puedan afectarla.

En este trabajo se analiza la geoquímica y los isótopos estables de 12 nuevas muestras de agua, representativas de diferentes sectores del área de estudio. Los resultados preliminares indican que las aguas de la cuenca Salar de Maricunga se encuentran enriquecidas en cloruro, sodio, boro y litio respecto a las aguas de la cuenca Quebrada de Paipote, ya que estarían afectadas por procesos geológicos similares, pero de diferente intensidad. Sin embargo, la mayor parte de los elementos químicos analizados no muestran diferencias entre cuencas, y los resultados de estadística multivariante indican que la mayoría de las muestras analizadas están correlacionadas entre sí. Además, el análisis de isótopos estables de agua indica que las aguas se ubican en una misma línea de evaporación que afecta con mayor intensidad a las aguas de la cuenca Quebrada de Paipote.

A pesar de que el número de muestras analizadas no ha permitido aclarar la existencia de una conexión entre estas cuencas, esta nueva información reabre un debate olvidado que se vuelve relevante en el contexto actual que existe entre la minería y el medio ambiente en cuencas de estas características en el norte de Chile. La existencia de un sistema hidrogeológico interconectado deberá ser validado por trabajos futuros que contemplen nueva información del área de estudio.

Palabras Clave: Hidrogeología, Territorio indígena, Salar, Cuencas endorreicas, Interconexión de cuencas.

Susceptibilidad a escasez hídrica de la Cuenca del Río Aconcagua frente a escenarios de cambio climático

Catalina Ferrada Villanueva¹⁻², Alejandra Stehr Gesche¹, Mariela Yévenes Burgos¹, Macarena Acuña Bustamante²

(1) Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales, Concepción, Chile

(2) ENVIS SpA., Geociencias, Santiago, Chile

La escasez hídrica es un fenómeno que ocurre cuando la demanda de agua supera la oferta de agua disponible en una cuenca hidrográfica, mientras que, la susceptibilidad a la escasez hídrica se relaciona con la evaluación de variables en las cuencas hidrográficas ante los escenarios de cambio climático.

En Chile, se ha analizado la escasez hídrica a través de la evaluación de las tendencias climáticas históricas y las proyecciones futuras para el análisis de los posibles impactos en los regímenes hidrológicos, teniendo en cuenta que las variaciones hidrometeorológicas producidas por el cambio climático tendrán un impacto significativo en el balance hídrico del país, especialmente en las regiones de la zona centro-sur. Adicionalmente, se han llevado a cabo diversos estudios hídricos e hidrogeológicos que relacionan de manera cualitativa el balance hídrico de las cuencas hidrográficas con la geología. Sin embargo, dichos estudios no consideran la infiltración como una variable dentro del cálculo de entradas y salidas del sistema. Por lo tanto, la presente investigación tiene por objetivo establecer una relación cuantitativa entre la geología y el balance hídrico, para identificar la tendencia de la disponibilidad hídrica en la Cuenca del Río Aconcagua frente a escenarios futuros

Para evaluar la disponibilidad de agua de una cuenca es necesario contar con estudios hidrológicos y realizar un balance hídrico a partir de datos hidrometeorológicos. La ecuación general del balance hídrico de una cuenca determina la variación del contenido de agua almacenada en los distintos compartimentos de la hoya hidrográfica (ΔS) en un intervalo de tiempo dado (Δt) considerando la diferencia entre precipitación y las pérdidas evapotranspirativas (ET), y el caudal de salida de la cuenca (Q') que incorpora los registros observados a la salida de cada sistema (DGA, 2017), como sigue a continuación:

$$\Delta S \Delta t = P - ET - Q' \quad (1)$$

Se menciona, además, la ecuación propuesta por Todd & Mays (2005), la cual relaciona la interacción de aguas subterráneas y superficiales:

$$\Delta S = P - Q - ET - I \quad (2)$$

$$\Delta(S_s + S_g) = P - (Q_{out} - Q_{in}) - (ET_s + ET_g) - (G_{wout} - G_{win})$$

donde,

- S: Almacenamiento (s: superficial, g: subterránea)
- P: Precipitaciones
- Q: Caudal
- ET: Evapotranspiración (s: superficial, g: subterránea)
- I: Infiltración (Gw: Groundwater)
- in: entrada
- out: salida

Como bien señala la ecuación (2) propuesta por Todd & Mays (2005), es necesario considerar la variable infiltración en el balance hídrico y por consiguiente las características intrínsecas del sustrato a través de estudios geológicos e hidrogeológicos de las cuencas hidrográficas.

Dentro del planteamiento metodológico de este estudio, se evaluará la disponibilidad de agua de la cuenca hidrológica frente a escenarios de cambio climático, realizando un balance hídrico que incluya cuantitativamente la geología de la zona de estudio, utilizando valores de infiltración para distintas unidades litológicas. Una vez determinado el balance hídrico de la cuenca del Río Aconcagua se analizará la oferta y demanda para identificar si la cuenca presentará un balance hídrico positivo o negativo frente a escenarios de cambio climático.

La metodología consta de tres ejes principales:

- Definición de área de estudio: Se define como área de estudio la cuenca del Río Aconcagua, la cual es considerada como una zona altamente vulnerable, pues el cambio climático ha impactado fuertemente en ella, aumentando la temperatura media anual y modificando los patrones de precipitación (CR2, 2021).
- Levantamiento de información: Se trabaja con información secundaria (bibliográfica), datos históricos DGA (datos hidrometeorológicos), archivos vectoriales y espaciales de IDE Chile, Geología identificada por Sernageomin (2003)

- Sistematización de datos: Se trabaja la información en bases de datos y aquellos datos que se encuentran georreferenciados son procesados mediante software SIG. Posteriormente, se aplica álgebra de mapas para ponderar valores de las distintas variables a utilizar en el balance hídrico.

Este estudio pretende resaltar la importancia de la geología al incorporar esta variable de manera cuantitativa en los cálculos de balance hídrico de una cuenca. Se pretende también evaluar la disponibilidad hídrica de la cuenca del Río Aconcagua, a través de la identificación de la oferta y demanda de la cuenca de manera histórica. Esto se realizará utilizando proyecciones de variables climáticas al año 2060, lo que permitirá determinar la susceptibilidad a escasez hídrica frente a distintos modelos de cambio climático utilizando el escenario RCP8.5. De manera que, este estudio plantea que al año 2060 la demanda de agua superará en un 40% a la oferta de disponibilidad de agua en la cuenca del Río Aconcagua.

Palabras Clave: Escasez hídrica, hidrogeología, cambio climático.

Agradecimientos: A la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción por incentivar el crecimiento científico y a ENVIS SpA. por el apoyo en realizar la presente investigación.

Referencias:

- DGA, 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional. SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.
- Todd, D. & Mays, L., 2005. Groundwater Hydrology.
- John Wiley & Sons, Inc. SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.

Soil moisture and precipitation influence on seasonal streamflow and groundwater response in a small Mediterranean forested catchment in central Italy

Marcos Simon Macchioli Grande¹, Kostantinos Kaffas², Matteo Verdone², Marco Borga³, Claudia Cocozza², Andrea Dani², Alessandro Errico², Ginevra Fabiani²⁻⁴, Laurent Gourdol⁴, Julian Klaus⁵, Francesca Manca di Villahermosa², Christian Massari⁶, Laurent Pfister⁴⁻⁷, Federico Preti², Catalina Segura⁸, Cyrille Tailliez⁴, Paolo Trucchi², Giulia Zuecco³, Daniele Penna²

(2) University of Florence, Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry, Via di San Bonaventura 13, Florence, Italy

(3) University of Padova, Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry, Viale dell'Università, Legnaro, Italy

(4) Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), Department of Environmental Research and Innovation, Avenue des Hauts-Fourneaux, Esch-sur-Alzette, Luxembourg

(5) University of Bonn, Department of Geography, Regina-Pacis-Weg 3, Bonn, Germany

(6) National Research Council, Research Institute of the Geo-Hydrological Protection, Via della Madonna Alta 126, Perugia, Italy

(7) University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine, Avenue de l'Université, Esch-sur-Alzette, Luxembourg

(8) Oregon State University, College of Forestry, 671 SW 26th Street, Corvallis, United States

Hydrological processes in forested catchments featuring an increment in the frequency of dry periods are being increasingly studied. To better understand the role of seasonality of the meteorological forcing in streamflow response, we studied a small forested experimental catchment in the Mediterranean region.

The Re della Pietra is an experimental catchment of 2 km² located in the Tuscan Apennines, Central Italy. Elevation ranges from 1,280 to 650 m a.s.l. It has a Mediterranean temperate climate with a wet (November-May) and a dry period (June-October). The average annual precipitation depth is approximately 1,300 mm (period 1992-2022). Forest cover is close to 100%, consisting mainly of beech trees, with minor oak trees and conifers. The equipment includes a weather station, four stream gauges (0.3 – 2 km²), soil moisture probes at two depths (15 cm and 35 cm), and three groundwater wells located in the riparian zone and at the footslope, equipped with piezometric level loggers, installed at the headwater catchment. In addition, stream stage and electrical conductivity was monitored in three stream sections comprising nested sub-catchments. Hydrometeorological data were collected for one year, from 19 January 2021 to 20 January 2022. We studied 34 precipitation-runoff events at the headwater catchment, and performed EC-based hydrograph separation at such events, and at annual scale. Additionally, hydrograph separation was performed at the nested sub-catchments.

Results indicated a marked seasonality in the meteorological forcing at the headwater catchment, with a wet season characterized by higher precipitation depth, a coupled soil moisture signal between different depths, and streamflow with high peakflows and long recessions. Conversely, the dry season includes lower precipitation depths, decoupled soil moisture at both depths, and stream stages with flashy responses and short recessions. At the event scale, the combination of antecedent soil moisture and precipitation controls the non-linear response of streamflow, groundwater, and different event water fractions in the wet and dry periods. Stream stages varied seasonally and between sub-catchments. Stream stages and event water fractions vary both seasonally and between different spatial scales. Streamflow increases with increasing sub-catchment size, and antecedent wetness triggers a faster streamflow response due to higher connectivity along the hillslope in the wet period, with higher event water fractions at the upper sub-catchments. Time lags between peak flows at the multiple spatial scales show a complex pattern suggesting the interaction of multiple factors controlling timing of streamflow peaks in the study catchment.

Overall, these results provide new and useful insights on the influence of seasonality of the meteorological forcing on the hydrological response of Mediterranean forested mountain catchments at the headwater scale, and between multiple spatial scales. Further research covering longer time spans and at other forested mountain catchments will aid at better understanding these climate change-sensitive Mediterranean catchments.

Keywords: Seasonality, Hydrological response, Hydrograph separation, Time lags, Multiple spatial scales.

Financing: "WATER mixing in the critical ZONE: observations and predictions under environmental changes – WATZON" (PRIN 2017, n° 2017SL7ABC), Italian Ministry of University and Research (MIUR) "Unravelling interactions between WATER and carbon cycles during drought and their impact on water resources and forest and grassland ecosystems in the Mediterranean climate – WATERSTEM" (PRIN 2017, n° 20202WF53Z), Italian Ministry of University and research (MIUR) "Carbon and water cycles interactions during drought and their impact on WATER and ForEST Resources in the Mediterranean region -WAFER", Italian National research Council "Space-time patterns of tree water uptake at hillslopes with contrasting climate and geology- STEP-UP" (code: AFR/STEP-UP ID 12546983), Fonds National de la Recherche Luxembourg National program for Brief research internships abroad for postdoctoral students grant (CONICET, Argentina).

Acknowledgements: We thank the local Forest Service (Unione Comuni Valdarno e Valdisieve) for their support, and Dr. Ilaria Zorzi and undergraduate students who collaborated in extensive fieldwork.

Evaluación de Potenciales Aportes Hipersalinos de Salmuera al Sistema Lacustre La Punta - La Brava, Zona Sur del Salar de Atacama, Región de Antofagasta

Mauricio Medina Cáceres¹⁻², José Luque², Javier Escudero³, Jordán Jofré³, Francisco Mondaca³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto - Ceitsaza, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Unidad de Medio Ambiente del Consejo de Pueblos Atacameños, Domingo Atienza 646, San Pedro de Atacama, Chile

La cuenca del Salar de Atacama es un rasgo morfoestructural que aloja uno de los más grandes salares conocidos del planeta. El Salar de Atacama corresponde a un sistema hidrogeológico complejo debido a que comprende diferentes subsistemas hídricos subterráneos, siendo los principales: 1) la salmuera del núcleo de halita y 2) los acuíferos salobres ubicados en la zona marginal del salar. Estos cuerpos de aguas se diferencian entre sí por poseer distintas densidades: el acuífero salobre de la zona transicional posee bajas densidades (1 g/cm^3) mientras que el acuífero de salmuera del núcleo de halita tiene densidades más altas (1.225 g/cm^3). La interacción entre esos distintos cuerpos de aguas de distintas densidades genera una zona de inmiscibilidad líquida conocida como zona de mezcla o interfaz salina. Este cuerpo de agua salobre se acuña en dirección al núcleo de halita del Salar de Atacama y, por diferencias de densidad, se superpone al acuífero de salmuera, dando origen a la cuña salina de la zona transicional. Debido a que esta zona responde a una diferencia de densidad se genera una barrera semipermeable del flujo, permitiendo el ascenso del agua salobre a superficie dando origen a las lagunas y vegas en los márgenes Este y Sur del Salar de Atacama. En la zona sur del Salar de Atacama se ubica el sistema lacustre La Punta y La Brava: estos cuerpos de aguas superficiales corresponden a lagunas freáticas ubicadas en la zona de Tilopozo y tienen como fuente principal la descarga del acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo proveniente desde el sur. Sin embargo, aún existen dudas si estos sistemas lacustres reciben aportes hipersalinos provenientes del acuífero de salmuera ubicado al norte de las lagunas y alojado en el núcleo de halita del Salar de Atacama. Estudios de la hidrogeoquímica de los cationes mayoritarios, metal(-oid)es, isotopía estable del agua (Deuterio y Oxígeno-18) y tierras raras (REE), junto a las relaciones espaciales y temporales de estos elementos, son usados en esta investigación para identificar el comportamiento y los posibles patrones de trazabilidad de estos elementos asociados a potenciales aportes hipersalinos procedentes de la salmuera del núcleo de halita al sistema lacustre La Punta y La Brava. Estos potenciales aportes tendrían su origen por la presencia de posibles sistemas estructurales localizados en las inmediaciones de la Falla Salar, que generarían el ascenso de la salmuera a zonas superficiales, mezclándose con las aguas salobres de las lagunas y los afloramientos aledaños al sistema lacustre. Los análisis de isotopía estable de Oxígeno-18 y Deuterio son herramientas útiles para la identificación de procesos de evaporación que ocurran en estos sistemas lagunares, así como de potenciales procesos de mezcla entre la salmuera del núcleo de halita con el acuífero salobre Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. En la zona oriental del cuerpo principal de La Brava hay presencia de cuerpos de disolución kársticos (dolinas), que pueden mostrar patrones de trazabilidad de distintos elementos disueltos en las aguas, indicando este ascenso de fluidos hipersalinos profundos a superficie, mediante recirculación de salmuera a través del potencial sistema estructural de la Falla Salar. La identificación de estos patrones de trazabilidad de metal(-oid)es y REE en las aguas entre la salmuera, los acuíferos salobres y el sistema lacustre La Punta y La Brava, son indicadores de potenciales aportes hipersalinos a zonas más superficiales, expresados en el cuerpo principal de La Brava y las dolinas.

Palabras Clave: Trazadores, Salmuera, Dolinas, Aporte hipersalino, Hidrogeoquímica.

Financiamiento: Proyecto FIC-R, Antofagasta 2020 TRANSFERENCIA PLAN HIDROLÓGICO PARA PROTEGER LAGUNAS ALTIPLÁNICAS (C.BIP 40023864-0).

Caracterización en registros de pozo de la cobertura fluvio-glacial en el ámbito del Yacimiento Arenal, Tierra del Fuego, Chile

Álvaro Pérez Pérez¹, Danilo González Faletto¹

(1) Empresa Nacional del Petróleo, Depto. de Estudios de Exploración, JOSÉ NOGUEIRA 1101, PUNTA ARENAS, Chile

La parte Norte de Tierra del Fuego está cubierta por un paquete sedimentario, de 80 a 150 m de espesor, formado por la intercalación de gravas, arenas y arcillas, descrita como materiales detríticos diamicticos (e.g. Prieto, 1988). En aquel lugar se dispone discordantemente sobre la formación Palomares, de edad Miocena (Pinto et al., 2022), Sin embargo, más al sur, en la franja que se extiende en dirección aproximada NNW-SSW, entre la Península Juan Mazía y la Bahía de San Sebastián, estos depósitos descansan sobre el lecho carbonoso de la Formación Filaret.

En superficie, la unidad conforma relieves propios de los procesos glaciares, como eskers, drumlins, kames y kettles, así como materiales que han sido arrastrados por el agua de deshielo y luego depositados más allá de la morrena (outwash). Estos rasgos han sido estudiados desde el siglo pasado (e.g. Caldenius, 1932; Céspedes, 1974; Marangunic, 1974; Darvill et al., 2014) y se ha interpretado que los depósitos más jóvenes están, en general, confinados a las cercanías de los canales marinos, mientras que los depósitos más antiguos conforman las morrenas más altas y alejadas de las costas actuales.

La unidad ha sido reconocida en numerosos sondeos petroleros que la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) ha realizado en el área desde hace más de medio siglo. Sin embargo, no existen trabajos que integren esta información con lo reconocido en superficie. La estratigrafía de muchos de los pozos petroleros se sustenta en el muestreo sistemático de los fragmentos de rocas desgarrados por el trépano y elevados por el lodo de perforación hasta superficie ("cuttings"). Sin embargo, la calidad de estos recortes, a veces demasiado partidos y mezclados con materiales de arrastre pertenecientes a los niveles superiores de perforación, dificulta su uso en la elaboración de hipótesis relacionadas con procesos fluvio-glaciales.

En el marco de los compromisos adquiridos con el Servicio de Evaluación Ambiental y la Dirección de Aguas del Estado de Chile, y con el afán de identificar los potenciales acuíferos de esta unidad, ENAP ha adquirido en 5 pozos del Yacimiento Arenal ZG, en Tierra del Fuego, una serie de registros eléctricos, correspondientes a herramientas de extendido uso en la industria petrolera, que incluyen perfiles de radiactividad natural (GR), resistividad, potencial espontáneo (SP) y tiempo de tránsito (DT), además otros 15 sondeos donde se ha registrado GR y resistividad. A su vez, estos pozos cuentan con descripciones litológicas a partir de *cuttings*. Estos datos abarcan un área de 75 km². Por su ubicación, próxima a la línea de costa actual del Estrecho de Magallanes, estos depósitos se asocian a los eventos glaciales recientes.

Atendiendo a la litología descrita, interpretada según el patrón electrográfico de los perfiles geofísicos, es posible distinguir al menos tres electrofacies: 1) patrones en bloque de lecturas bajas de GR y DT alto, asociadas a litologías predominantemente gruesas, y que, son interpretados como tills de eventos de fusión del glaciar; 2) lecturas altas de GR y DT atenuado, que evidencian niveles arcillosos, interpretados como lagos de origen glaciar y 3) aumento de tamaño de grano según tendencia de GR, que estaría relacionada con secuencias de avance y estancamiento del hielo. La interpretación de estas electrofacies se respalda en la lectura de Bleuer (1991), Paillet & Reese (2000) y Crow et al. (2017).

Por su parte, las respuestas de los perfiles de SP y resistividad sugieren la presencia de acuíferos de entre 10 m y 20 m de espesor, asociadas a litologías predominantemente gruesas, es decir, a la electrofacies que manifiesta patrón en bloque, con lecturas bajas de GR y DT alto (1).

ENAP construye sus pozos de explotación de hidrocarburos en al menos dos etapas de perforación: una de diámetro mayor, que atraviesa los acuíferos y otra de diámetro menor, que alcanza la profundidad de los reservorios. Luego, estos agujeros son revestidos con cañerías de acero, y una cementación del espacio anular entre la pared del pozo y la cañería más ancha, hasta superficie. Este diseño impide la comunicación vertical entre las napas, ubicadas en los primeros metros de la perforación, con los reservorios productores de gas o petróleo que yacen a más de 2000 m de profundidad, preservando la aislación natural que existe entre estos dos sistemas porosos.

Esta interpretación de electrofacies corresponde a una primera aproximación al empleo de estas herramientas para la identificación de procesos fluvio-glaciales en Magallanes. Su implementación a mayor escala promete mejorar los modelos hidrogeológicos de la región en tiempos en que la escasez hídrica se ha convertido en una dificultad para el desarrollo cultural y económico de la región.

Palabras Clave: Hidrogeología, Cuenca de Magallanes, acuífero, depósitos fluvio-glaciales.

Agradecimientos: Los autores agradecen a las gerencias de ENAP Magallanes por permitir la publicación de este trabajo y brindar su invaluable apoyo otorgando el tiempo y los recursos necesarios para su realización.

Referencias:

- Bleuer, N. K. (1991). Nature of glacial and other unconsolidated sedimentary sequences interpreted through downhole gamma-ray logging. Geological Survey at Indiana University, Department of Natural Resources. Bloomington: Printed by authority of the State of Indiana.
- Caldenius, C. Z. (1932). Las glaciaciones Cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego. Geographiska Annaler, 1-164.
- Céspedes, S. (1974). Búsqueda de arcillas bentónicas en la provincia de Magallanes. Empresa Nacional del Petróleo. Punta Arenas: Inédito, Archivo Técnico de Exploraciones, Magallanes.
- Crow, H., Hunter, J. A., Olson, L. C., Pugin, A. J.-M., & Russell, H. A. (2017). Borehole geophysical log signatures and stratigraphic assessment in a glacial basin, southern Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences.
- Darvill, C. M., Stokes, C., Bentley, M. J., & Lovell, H. (2014). A Glacial Geomorphological Map of the Southernmost Ice Lobes of Patagonia. Journal of Maps.
- Marangunic, C. (1974). Los depósitos glaciales de la Pampa Magallánica. Revista geográfica de Chile, 22-23, 5-11.
- Paillet, F. L., & Reese, R. (2000). Integrating borehole logs and aquifer tests in aquifer characterization. Ground Water, 38(5), 713-725.
- Pinto, J., Pérez, A., & Velásquez, A. (2022). Revisión del marco estratigráfico e hidrogeológico para el sistema de acuíferos de la Cuenca de Magallanes, Chile. XI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas.
- Prieto, X. (1988). Geología del Cuaternario del área de Cabo Negro, Estrecho de Magallanes, Chile. Anales del Instituto de la Patagonia, 35-41.

Influencia de los procesos geológicos en la composición geoquímica de las aguas subterráneas de la zona de Pica y Pampa del Tamarugal, norte de Chile

Camila Andrea Quintana Ortiz¹, Fernanda Álvarez Amado¹⁻², Camila Poblete Gonzalez¹, Linda Godfrey³

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Water Research Center for Agriculture and Mining, CHIRAM, FONDAF ANID Center, Victoria 1295, Concepción, Chile

(3) Rutgers University, Department of Earth and Planetary Sciences, Geology, Busch Campus, 610 Taylor Rd, Piscataway, New Jersey 08854-8066, United States

En el Desierto de Atacama se encuentra la cuenca endorreica más grande de Chile, la cual en profundidad alberga acuíferos que se han recargado principalmente en tiempos pre-holocenos en periodos húmedos (Margaritz *et al.*, 1990; Gallo *et al.*, 2012), actualmente la tasa de precipitación en el sector es menor a 10 mm/año, y la tasa de evaporación se calcula entre los 2000 y 3000 mm/año (Houston, 2006; Scheihing *et al.*, 2017). Actualmente las aguas de la zona de Pica se recargan de las precipitaciones en la parte alta de la Precordillera, por sobre los 2500 m s.n.m. El transporte de las aguas se ve favorecido por las fallas del sector, pues permiten el flujo de agua desde la Precordillera hasta el Valle Central.

El acuífero Pica-Pampa del Tamarugal tiene la característica de clasificarse como un sistema multiacuífero, donde se distinguen al menos dos niveles importantes, un acuífero libre más somero albergado en unidades sedimentarias y un acuífero confinado en un sector más profundo, estos dos niveles están separados por una capa de ignimbritas que por su condición fracturada actúa como acuitado, permitiendo la transmisión de agua hacia el acuífero superior.

Para este trabajo se analizan las composiciones químicas de elementos mayores para distintos tipos de agua del Piedemonte Andino (superficiales, manantiales geotermiales, meteóricas y subterráneas) y para aguas subterráneas del Valle Central. La caracterización hidrogeoquímica de las aguas indica que las que se encuentran en el Piedemonte Andino presentan distintas composiciones según el tipo de agua. Las aguas meteóricas y de manantial geotermal presentan composición cercana al campo de $\text{HCO}_3\text{-Na}$, además estas presentan bajo TDS (214 ppm); las aguas subterráneas que se encuentran más someras se presentan con composiciones $\text{SO}_4\text{-Na/Ca}$ y las aguas subterráneas más profundas (>80m) caen en los campos Cl-Ca/Na , el TDS de estas clasifica como aguas dulces moderadamente mineralizadas y salobres. En el Valle Central las aguas subterráneas presentan composiciones $\text{SO}_4\text{-Na/Ca}$ y Cl-Na/Ca .

En base a la geología del sector con su respectiva mineralogía, y las muestras de agua, se identifican los procesos geológicos que afectan la geoquímica de las aguas. Para caracterizar estos procesos se calculan modelos hidrogeoquímicos con el *software* libre PHREEQC, los cuales se plantean en base a los siguientes procesos: i) interacción agua-roca, ii) mezclas de agua y iii) evaporación. Los procesos de interacción agua-roca se calculan a través de modelos inversos cuyos resultados indican interacción con fases minerales descritas en la litología. Complementando los modelos geoquímicos con diagramas binarios de $\text{Na-Ca-SO}_4/\text{Cl}$ y Ca/SO_4 se observa que el contenido de HCO_3^- es incorporado a las aguas a partir de rocas volcánicas, a través del proceso de meteorización de feldespatos; La disolución de minerales constituyentes de rocas sedimentarias aportan al contenido de solutos de Na, Ca, y SO_4 con la disolución de minerales evaporíticos como halita yeso y calcita; El ión cloruro queda almacenado como ión remanente producto de una larga interacción con minerales clorurados. Los modelos de mezclas de aguas proponen comprobar posibles mezclas de aguas a través de fracturas que conectan los distintos sectores del acuífero. Los modelos de evaporación buscan establecer la evolución de composición de las aguas en el proceso de transporte de aguas hacia la Pampa del Tamarugal y su posterior almacenamiento, estos se calculan con modelos inversos y directos. Los resultados de los modelos inversos indican que las composiciones de las aguas están en el dominio de la roca hospedante, en distintos grados de interacción. El proceso de mezcla de agua no es posible de comprobar a través de los modelos de mezcla, pero sí es posible descartar interacciones como entre las aguas subterráneas y geotermiales para obtener la composición superficial. Los procesos de evaporación siguen las rutas de evaporación propuestas por Risacher *et al.*, (1999), donde la precipitación de calcita y disolución de yeso son procesos importantes en lo que deriva su composición.

En las aguas estudiadas la composición geoquímica se ve determinada por el control litológico y estructural, que a su vez condicionan los tiempos de residencia y transporte. Los procesos geológicos mejor identificados son interacción agua-roca, seguido por evaporación. Se puede observar la evolución geoquímica de estas desde una composición inicial con el HCO_3^- como ión dominante, evolucionando desde aguas sulfatadas hasta aguas cloruradas, coherente con la evolución natural que propone Chebotarev (1955).

Palabras Clave: Geoquímica, hidrogeoquímica, Hidrogeología, pHreeQC.

Financiamiento: El trabajo se enmarca en un proyecto de tesis financiado por el proyecto Fondecyt Iniciación 11160325.

Agradecimientos: Al proyecto Fondecyt Iniciación 11160325, y a Fernanda Álvarez Amado, quien lo dirige. A mis compañeras de trabajo Camila Poblete Gonzalez y Linda Godfrey.

Referencias:

- Gayo, E.M.; Latorre, C.; Jordan, T.E.; Nester, P.L.; Estay, S.A.; Ojeda, K.F. y Santoro, C.M. (2012a). Late Quaternary hydrological and ecological changes in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (21°S). Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 26(15), 2181-2198.
- I.I. Chebotarev. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1, Geochemica et Cosmochimica Acta, Volume 8, Issues 1–2, Pages 22-48, ISSN 0016-7037.
- Magaritz, M.; Aravena, R.; Peña, H.; Suzuki, O. y Grilli, A. (1990). Source of groundwater in the deserts of northern Chile: evidence of deep circulation of groundwater from the Andes. Ground Water 28(4):513–517.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods.
- Placencia, G. (2020). Las aguas subterráneas del oasis de Pica: patrones de circulación y procesos de contaminación en el Desierto de Atacama. Memoria para optar a magister en ciencias mención geología. Universidad de Chile.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar Méndez, C. (1999). Dirección General de Aguas. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones - Chile. DGA. División de Estudios y Planificación.
- Scheihing, K.W.; Moya, C.E. y Tröger, U. (2017). Insights into Andean slope hydrology: reservoir characteristics of the thermal Pica spring system, Pampa del Tamarugal, northern Chile. Hydrogeology Journal, 25(6), 1833. doi:10.1007/s10040-017-1533-0.
- Viguier, B., Daniele, L., Hervé, J., Leonardi, V. y Yáñez, G. (2019). Changes in the conceptual model of the Pampa del Tamarugal Aquifer: Implications for Central Depression water resources, Journal of South American Earth Sciences.

Técnicas de Bajo Costo para el Análisis Multitemporal y Monitoreo de los Glaciares del Complejo Volcánico Planchón - Peteroa - Azufre, Región del Maule, Chile

Emil Stefani Signorio¹, Catalina Medina Porcile², Cristian Peralta Abasolo³, Felipe Ugalde Peralta³, Rodrigo Pérez Garay¹

(1) Fundación Geoparque Pillanmapu, Calle 16 Sur, 542, Talca, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Edmundo Larenas 1234, Concepción, Chile

(3) Geoestudios Ltda., Los Aromos 3371, Las Vertientes, San José de Maipo, Santiago, Chile

Los glaciares del territorio del Proyecto Geoparque Pillanmapu, ubicado en la cordillera maulina, han retrocedido de manera sostenida desde, al menos, la década de 1950. Bajo el actual contexto de megasequía y cambio climático, los procesos de ablación se han visto acelerados en las últimas dos décadas. A partir de inventarios de glaciares existentes, junto con uno realizado para efectos del presente trabajo a partir de imágenes satelitales del año 2021, se infiere una tasa de reducción de área y volumen de $-1,1 \text{ km}^2$ anuales y $-0,02 \text{ km}^3$ anuales, respectivamente, entre los años 2000 y 2021.

Frente a la constante evolución de los glaciares y su relevancia en las estrategias de gestión territorial, urge la implementación de técnicas que permitan un monitoreo sostenido en el tiempo. Sin embargo, muchas de las técnicas utilizadas actualmente requieren una logística compleja y/o representan costos, por lo general, inasequibles. Ante dicha problemática, se diseñaron y confeccionaron dos cámaras de bajo costo programadas para registrar, de manera autosuficiente, y mediante secuencias fotográficas, variaciones en la superficie de glaciares. Las cámaras fueron diseñadas intentando optimizar el peso, el consumo energético y la resistencia a la intemperie. De este modo, cada cámara tiene un peso aproximado de 8 kg, incluyendo la electrónica, el revestimiento y todo el equipo necesario para su montaje. Por otro lado, cuentan con una autonomía teórica de carga superior a un año tomando 5 fotografías al día.

Como complemento, se realizaron balances geodésicos de masa mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV por sus siglas en inglés). En glaciares de tamaño reducido, los UAV representan una oportunidad sin precedentes para establecer Modelos Digitales de Elevación (o MDE) de alta resolución tanto espacial como temporal. Además, son una solución de bajo costo y de fácil implementación.

Para poner a prueba los métodos recién descritos, se seleccionaron dos glaciares ubicados en la ladera poniente del Complejo Volcánico Planchón - Peteroa - Azufre (CVPPA). Las cámaras autosuficientes fueron instaladas, una después de la otra, mirando al frente del glaciar código CL107103008 (según el IPG2022_v1), referido como glaciar Volcán Planchón Peteroa Norte, o VPPN, para efectos de este estudio. Los vuelos UAV se realizaron en el vecino glaciar código CL107103009, referido a su vez como glaciar Volcán Planchón Peteroa Sur (VPPS), ubicado inmediatamente al sur del glaciar VPPN.

Las cámaras autosuficientes lograron una autonomía de 96 días para la primera cámara, entre el 4 de abril y el 8 de julio de 2021, y de 78 días para la segunda, entre el 22 de enero y el 9 de abril de 2022. De este modo, se obtuvo un registro total de 174 días que muestra la acumulación nival de los meses otoñales e invernales junto con la ablación del frente glaciar durante los meses estivales. A la fecha de redacción de este resumen, los resultados obtenidos a partir del registro de las cámaras autosuficientes se encuentran aún en desarrollo, pero se estima un retroceso estimado de al menos 20 m en el frente del glaciar VPPN.

Por otro lado, se generaron dos MDE a partir de los vuelos UAV. El primer modelo del 4 de abril de 2021, mientras que el segundo del 17 de abril de 2022. Ambos MDE alcanzaron resoluciones de 25 y 9 cm, respectivamente, con una diferencia de altura promedio de $-5,8 \text{ m}$, equivalente a $-4,9 \text{ m.w.e.}$ En algunos puntos del glaciar, este número asciende a una pérdida de más de 15 m de la columna glaciar.

A modo de conclusión, mediante el presente trabajo se lograron poner a prueba dos técnicas de fácil implementación y bajo costo que permiten el monitoreo periódico de glaciares. Dichos métodos pueden ser mejorados para obtener resultados más precisos y aumentar la resistencia de la instrumentación instalada en terreno. En particular, se sugiere realizar cambios en la estructura de las cámaras autosuficientes para hacerlas más resistentes al peso que ejerce el manto nival sobre ellas, así como cambios en el sistema de alimentación para una mayor autonomía. Finalmente, los resultados obtenidos dan cuenta que los glaciares de la ladera poniente del CVPPA retrocedieron dramáticamente en el período 2021-2022, con una disminución mayor a 5 metros del nivel del hielo para el VPPS y, al menos, un retroceso de 20 metros del frente del glaciar VPPN.

Palabras Clave: Glaciar, Balance de masa, Análisis Multitemporal.

Financiamiento: Financiado por la Fundación Geoparque Pillanmapu.

Agradecimientos: A Catalina Medina, Cristian Peralta, Felipe Ugalde y Rodrigo Pérez. A los arrieros que nos acompañaron.

Referencias:

- Aguilera, F., Benavente, Ó., Gutiérrez, F., Romero, J., Saltori, O., González, R., Agosto, M., Caselli, A., & Pizarro, M. (2016). Actividad eruptiva del volcán Planchón-Peteroa durante el período 2010-2011, Zona Volcánica de los Andes del Sur, Chile. *Andean Geology*, 43(1), 20-46. <https://doi.org/10.5027/andgeoV43n1-a02>.
- Bamber, J. L., & Rivera, A. (2007). A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 138-148.
- Cao, B., Guan, W., Li, K., Pan, B., & Sun, X. (2021). High-resolution monitoring of glacier mass balance and dynamics with unmanned aerial vehicles on the Ningchan No. 1 Glacier in the Qilian Mountains, China. *Remote Sensing*, 13(14), 2735.
- Dall'Asta, E., Forlani, G., Roncella, R., Santise, M., Diotri, F., & di Cella, U. M. (2017). Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127, 102-114.
- Fugazza, D., Scaioni, M., Corti, M., D'Agata, C., Azzoni, R. S., Cernuschi, M., ... & Diolaiuti, G. A. (2018). Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and map glacier hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1055-1071.
- Giordan, D., Allasia, P., Dematteis, N., Dell'Anese, F., Vagliasindi, M., & Motta, E. (2016). A low-cost optical remote sensing application for glacier deformation monitoring in an alpine environment. *Sensors*, 16(10), 1750.
- Rossini, M., Di Mauro, B., Garzonio, R., Baccolo, G., Cavallini, G., Mattavelli, M., ... & Colombo, R. (2018). Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304, 159-172.
- Trombotto, D. T., Penas, P., & Aloy, G. (2014). Impact of volcanic processes on the cryospheric system of the Peteroa Volcano, Andes of southern Mendoza, Argentina. *Geomorphology*, 208, 74-87.

Correlación y modelado de las facies internas de la zona glauconítica en el subsuelo de Tierra del Fuego, Región de Magallanes, Chile

Aníbal Velásquez Arauna¹, Daniela Vallejos¹, Álvaro Pérez Pérez¹

(1) ENAP, Punta Arenas, Chile

La *zona glauconítica* es una unidad informal terciaria del subsuelo de la Cuenca de Magallanes, definida por Mohr (1945) en el primer pozo exploratorio de la Isla de Tierra del Fuego en Chile (Manantiales-1). Constituye una sucesión marina de plataforma media externa, desarrollada durante una transgresión regional generalizada en la Cuenca de Magallanes durante el Paleoceno y Eoceno. En la franja de subsuelo que se extiende aproximadamente entre San Gregorio, en la porción continental, por el NW, y más allá de Punta Piedra, por el SE, en la Isla de Tierra del Fuego, esta unidad ha demostrado contener hidrocarburos. Este es el motivo por el que ha suscitado interés desde los inicios de la exploración petrolera de Magallanes, atención reflejada en la abundante literatura que la refiere (Hauser 1964, Natland et al. 1974, Di Biase 1980, Biddle et al. 1986, Zurita et al. 2013, González et al. 2018, Pinto et al. 2022, Vallejos et al. 2023, entre otros). En la actualidad, estas rocas constituyen en el subsuelo de la Isla de Tierra del Fuego, el Yacimiento de gas Arenal ZG, con más 200 pozos perforados, el cual, para facilitar la extracción de sus recursos, requiere de estimulación mediante fracturamiento hidráulico, puesto que las rocas que la forman, aunque son de moderada porosidad, tienen muy bajas permeabilidades (rocas "tight").

Según la definición de Vallejos et al. 2023 la *zona glauconítica*, a nivel de su reservorio, en el caso de este estudio, limitado al sector norte de Tierra del Fuego, Chile, se podría dividir conceptualmente en 5 litofacies fundamentales, que de techo a base reciben el nombre de: Wackas con deformación sinsedimentaria "W(sd)", Wackas tobáceas "W(t)", Arcillolita Tobácea "A(t)", Wackas Verdes "W(v)" y Pelitas grises "P(g)". En este trabajo se establece un patrón electrográfico que caracteriza cada una de estas facies, descritas en los testigos corona, a partir de los registros de Gamma ray (GR), mineralógicos (ECS y GEM) y de factor fotoeléctrico (PEF).

En el área de estudio, que abarca 109 km² en el sector norte de Tierra del Fuego, se realizó una distinción de facies utilizando estas herramientas, en primera instancia, en 19 pozos, los cuales cuentan con registros mineralógicos, mientras en una segunda instancia esta relación se incorporará a más de 100 pozos con registros de PEF, de manera de obtener una mayor densidad de datos.

De este modo, e incorporando las interpretaciones petrofísicas de los diferentes pozos, se ha podido definir que la facies de Wackas tobáceas y Arcillolita tobácea son las que presentan mejores características petrofísicas, al tiempo de mostrar un mayor volumen de hidrocarburos disponibles en ellas, además de mejores permeabilidades, aun dentro de los parámetros de rocas "tight".

A partir de la correlación realizada se ha podido determinar la tendencia de los espesores de facies en el subsuelo del área de estudio, dando un primer indicio de la proyección hacia el suroeste de estas facies, y su distribución estratigráfica general, a fin de guiar el desarrollo y exploración futura de hidrocarburos.

Palabras Clave: zona glauconítica, registros eléctricos, hidrocarburos.

Agradecimientos: Los autores agradecen a las gerencias de ENAP Magallanes por permitir la publicación de este trabajo, y brindar su apoyo otorgando el tiempo y recursos necesarios para su realización.

Referencias:

- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum Jr., R.M., Fitzgerald, M.G., y Wright, R.C., 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America, en Allen, P.A., and Homewood, P., eds., Foreland Basins. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, p. 41-63.
- Di Biase, 1980. Distribución de lavas andesíticas en la base de la Zona Glauconítica. ENAP Informe Interno (inédito).
- González, A., Valderrama, J.M., Gschaidner, C.T., Adaros, R., Verdugo, M., Canessa, N.D., Pérez, A., Velásquez, A., Sánchez, J., Ahumada, M. y González, M., 2018. Desarrollo del "play tight gas" Zona Glauconítica, Bloque Arenal, Cuenca de Magallanes, Chile: caso estudio. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención, Mendoza, Argentina, p. 455-477.
- Hauser, A., 1964. La "Zona Glauconítica" en la plataforma Springhill, Magallanes, Chile". Tesis no publicada, Universidad de Chile, Escuela de Geología, 266 p.
- Mohr, C., 1945, Columna estratigráfica Pozo Manantiales-1. ENAP, Informe Interno (inédito), 1 p.
- Natland, M.L., González, E., Cañón, A. and Ernst, M., 1974. A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments. Geological Society of America, Memoir 139, p. 1-126. Pinto, J., Vallejos, D., González, A., 2022. Geología sedimentaria y diagénesis del reservorio gasífero no convencional paleoceno de la "zona glauconítica", bloque arenal, Tierra del Fuego, Chile.
- Vallejos, D., Velasquez, A., Perez, A., 2023, Modelo de facies sedimentarias Yacimiento Zona Glauconítica Arenal, Tierra del Fuego, Chile. En prensa.
- Zurita, E., Carpinelli, A., Trejo, S. and Saa, A., 2013. Gas resource potential from Maastrichtian-Eocene reservoir in Magallanes Basin, Chile. American Association of Petroleum Geologists, International Conference and Exhibition, Cartagena, Colombia, September 8-11, 2013, Search and Discovery Article no. 90166.

Obtención de datos hidrogeológicos en la supervisión de perforación de pozos: Una mirada metodológica

Nicolás Amengual Mondaca¹, Valeria Tort¹, Tiarén García-Pérez¹

(1) Área Hidrogeología, SRK Consulting Chile

La supervisión de perforación hidrogeológica puede desglosarse en 3 dimensiones operativas: mapeo hidrogeológico, control de perforación y pruebas hidráulicas. Un correcto desempeño de estas 3 actividades lleva a la obtención de datos hidrogeológicos necesarios y transversales a cualquier campaña de perforación, independiente de su objetivo específico.

En contraparte, una incorrecta supervisión de perforación hidrogeológica puede generar algunos de estos escenarios: (1) datos erróneos; (2) datos sin o poco contexto, por ende, sin valor interpretativo; (3) ausencia o insuficiencia de datos.

A modo de abordar esta problemática, el presente trabajo propone una serie de metodologías y criterios para el mapeo hidrogeológico, el control de perforación y las pruebas hidráulicas. Estas serán realizadas en base a los métodos de perforación de circulación reversa (RC) y dual rotary (DR), ambos ampliamente utilizados en estudios hidrogeológicos debido a su versatilidad en distintos terrenos, alta tasa de perforación en amplios rangos de diámetro y obtención de muestras sin contaminación, entre otros. El tipo de máquina asociada considera las Schramm y EDM para perforación en seco y Foremost para perforación con agua añadida. Por otro lado, el ambiente de perforación que atenderá este estudio corresponde a pozos en ambientes subdesérticos a desérticos con posibilidades o expectativas de bajo aporte de agua.

El mapeo hidrogeológico de este estudio considera el retorno tipo cutting. Este identifica, caracteriza e interpreta tramos de relevancia hidrogeológica. Por otro lado, el control de perforación se concentra en llevar registro de las herramientas utilizadas por los perforistas, los diámetros y el número de barras, la tasa de perforación, el control general del funcionamiento y estado de la máquina y la presencia de nivel de agua y/o zonas con humedad durante la perforación. Por último, con respecto a las pruebas hidráulicas este trabajo se centra en las tipo airlift. Estas se clasifican en (1) durante la perforación, que aproxima el caudal que aporta el pozo, y (2) con recuperación, el que además de aproximar el caudal permite obtener parámetros hidráulicos del tramo.

La experiencia conjunta de los autores en campañas de perforación con métodos RC y DR en contextos de distintas dinámicas hidrogeológicas, ha permitido recopilar una serie de criterios que llevan a:

1. Mapeo hidrogeológico: se indican metodologías para el reconocimiento de tramos débiles (por ejemplo, los tramos de cutting con un cambio abrupto de color, aumento importante de arcillas y/o fragmentos redondeados y bien seleccionados pueden indicar una falla), caracterizar correctamente la unidad geológica (por ejemplo, aproximaciones granulométricas con y sin agua), entre otros.
2. Control de perforación: se indican metodologías para la correcta toma de datos de la tasa de perforación, que aporta a reconocer el grado de compactación del terreno siempre que el funcionamiento de la máquina sea estable, y se entregan ejemplos. Se indica, además, la relación entre la presión de aire de la máquina, los cambios en parámetros de la máquina y la detección de cuerpos de agua. Se entregan indicaciones particulares a perforaciones con y sin agua.
3. Pruebas hidráulicas: Se indica la metodología para desarrollar una prueba tipo airlift durante perforación, considerando (1) la confirmación se está evaluando el agua de aporte del pozo, y no agua acumulada o de perforación; (2) la altura de las barras; y (3) el tiempo que se debe soplar para confirmar que el caudal es representativo. La prueba airlift con recuperación se puede realizar solo en máquinas que permitan medir nivel. En la máquina Foremost, donde no se puede, se muestran otros métodos para aproximarlos. Finalmente, se desglosa el hecho de que un airlift bien hecho puede obtener una proyección preliminar del rendimiento esperable de un pozo para su bombeo.

Para completar una buena supervisión de perforación, se recomienda también realizar una revisión bibliográfica de la geología e hidrogeología del área de estudio, mantener apertura de mente para replantear la hipótesis de trabajo a lo observado, y tener una interpretación continua de los datos in situ.

Palabras Clave: Sondajes hidrogeológicos, Pruebas hidráulicas, Métodos de perforación, Medios fracturados, Ambiente desértico.

Procesos de recarga y circulación de agua subterránea en la Cordillera de la Costa de los Andes áridos: Estudio hidrogeoquímico e isotópico de la cuenca del Arrayán, región de Coquimbo

Yerelin Ivette Cárcamo Palma¹⁻²⁻³, Matías Taucare⁵⁻⁶⁻⁷, Ronny Figueroa¹⁻², Etienne Bresciani¹⁻²⁻⁴

(1) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, Raúl Bitrán #1305, La Serena, Chile

(2) Consorcio Tecnológico Quitai Anko, Ovalle, Chile

(3) Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias, Av. Elena Haverbeck, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Facultad de Ingeniería, Av Libertador Bernardo O'Higgins #611, Rancagua, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(6) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(7) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

En regiones áridas, el agua subterránea juega un rol estratégico en el desarrollo de las actividades socioeconómicas. Para asegurar un uso sustentable de este recurso, es necesario entender el origen y el recorrido del agua subterránea en las cuencas aportantes. Sin embargo, los estudios hidrogeológicos en Chile se han enfocado principalmente en acuíferos aluviales ubicados en los fondos de los valles principales, los cuales cubren aproximadamente el 15% del territorio nacional. Así, se hace necesario mejorar la comprensión de los sistemas hidrogeológicos en cuencas secundarias y en medios fracturados, en particular en los Andes áridos. Por lo anterior, el presente estudio pretende desarrollar un modelo conceptual que explique el origen y la circulación de agua subterránea en los sistemas hidrogeológicos de la Cordillera de la Costa de la Región de Coquimbo. El estudio se enfocó en la cuenca del Arrayán, una cuenca aportante del río Elqui. La zona se caracteriza por una morfología montañosa dominada por roca volcánica y por valles transversales estrechos rellenos por depósitos aluviales poco profundos (< 30 m). Con dicho propósito, se realizó un análisis hidrogeoquímico (cationes, aniones, elementos traza) y de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) en aguas de diversas fuentes: 20 manantiales, 5 pozos, 6 trincheras, 4 piques mineros, 2 escorrentías superficiales y 39 muestras de precipitaciones, estas últimas distribuidas en distintos puntos de la cuenca del río Elqui. Los resultados muestran que las facies hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas son en su mayoría $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$, mientras que las muestras de escorrentía superficial son de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y las precipitaciones de tipo Cl-Ca . Para identificar similitudes hidrogeoquímicas entre las muestras y correlaciones entre los iones disueltos, se llevó a cabo un análisis estadístico multivariante. El análisis jerárquico de conglomerados agrupa las muestras según el tipo de litología de donde se obtuvieron las muestras, ya sea agua proveniente de roca o de relleno aluvial. Por su parte, el análisis factorial muestra que los procesos de interacción agua-roca tienen un control predominante sobre la composición del agua subterránea. Mientras que la disolución de sales (como yeso) caracteriza las muestras de pozos ubicados en los depósitos aluviales, la disolución de plagioclasas lo hace con las muestras obtenidas desde las rocas (manantiales, trincheras y piques mineros). Al comparar la composición isotópica del agua subterránea con la línea meteórica local establecida para la cuenca del río Elqui, se demuestra el rol preponderante de las precipitaciones locales y extremas en la recarga del agua subterránea que circula en la Cordillera de la Costa.

Palabras Clave: agua subterránea, hidrogeoquímica, isótopos estables de agua, zonas áridas, acuíferos fracturados.

Financiamiento: CORFO #19CTIGH-121324-03.

Modelo Hidrogeológico Proyecto Alternativo Depositación de Relaves en Rajos, Minera Centinela

Cristóbal Fernández¹, Carolina Milad¹, Alexandra Castillo¹, Francisco Vega², Fabian Suez²

(1) SRK Consulting (Chile) SpA, Av. Vitacura 2939, Piso 5, Las Condes, Santiago, Chile
(2) Minera Centinela, Av. Apoquindo 4001, Piso 18, Las Condes, Santiago, Chile

Introducción:

El presente trabajo resume el modelo hidrogeológico que fue elaborado por SRK Consulting Chile como parte de la DIA Proyecto Alternativo Depositación de Relaves en Rajos de Minera Centinela, aprobado mediante RCA N°20210200196, y que implica la disposición de relaves en forma secuencial dentro de los rajos Tesoro Central (TCN), Tesoro Noreste (TNE) y Esperanza (ESP) por un periodo estimado de 38 años de operación. Los relaves serán depositados con Cp de 62% y consideran la presencia permanente de una laguna de aguas claras en contacto con las paredes de los rajos.

La hipótesis de este estudio es que, debido a lo poco permeable del medio hidrogeológico en torno a los rajos, el flujo subterráneo es tan lento que el avance de las posibles infiltraciones de aguas de relave tendría un alcance limitado y, por tanto, un impacto no significativo.

Metodología:

Se desarrolló un modelo conceptual inicial donde se estimaron analíticamente las velocidades de flujo subterráneo en torno a los rajos una vez rellenos con relaves. Luego, se realizaron campañas de perforaciones para mejorar la caracterización de las unidades hidrogeológicas. Por último, se construyeron modelos hidrogeológicos numéricos 2D y 3D de flujo advectivo, y el uso de seguimiento de partículas para la evaluación del alcance máximo de potenciales infiltraciones para simulaciones futuras del proyecto.

Resultados y Conclusiones:

Los rajos que serán rellenos con relaves se encuentran en unidades hidrogeológicas (UH) que forman acuíclados, que son formaciones geológicas con baja permeabilidad y capacidad de transmitir agua subterránea. Los rajos TCN y TNE se encuentran en UH-2 que incluye sedimentos semiconsolidados del Eoceno al Mioceno, cuya conductividad hidráulica varía entre 10^{-4} y 5×10^{-2} m/d, con porosidad media de 13% y mínima de 6,3%. El rajo ESP se encuentra en UH-3 donde se agrupan todas las rocas existentes, con conductividades hidráulicas que varían entre 10^{-5} y 10^{-3} m/d, y porosidad estimada entre 0,5% y 3%.

El acuífero principal corresponde a UH-1 que incluye depósitos sedimentarios no consolidados fluviales y aluviales del Mioceno superior al Holoceno, y que presentan las mayores permeabilidades de la zona ($K = 0,1 - 1$ m/día). En el área de estudio esta unidad se limita al relleno de las quebradas principales y a pequeñas llanuras como la que se encuentra al este del rajo TNE, pero se hace más extensa y potente desde aproximadamente 12 km al oeste del proyecto, hasta la localidad de Sierra Gorda a unos 24 km, donde se encuentran las captaciones de agua subterráneas de terceros más cercanas.

A partir de los valores de conductividad hidráulica, porosidad y gradiente hidráulico obtenidos en el entorno de cada rajo, se estimó conceptualmente una velocidad del flujo de agua subterránea máxima del orden de 1 a 2 m/año. Además, de acuerdo con los resultados obtenidos en los modelos 2D y 3D para el caso base, como se muestra en las figuras 1 y 2, respectivamente, a los 500 años posteriores al cierre del proyecto, el alcance máximo de las partículas alcanzaría unos 640 m hacia el oeste del rajo TCN, unos 258 m hacia el este y 911 m hacia el norte del rajo TNE, y unos 545 a 582 m hacia el oeste del rajo ESP. También se realizaron escenarios de sensibilización para evaluar los resultados en función de las incertidumbres existentes para las variables principales del sistema, obteniendo como peor escenario un alcance máximo de 1432 m hacia el oeste del rajo ESP.

Como conclusión, las potenciales infiltraciones de aguas de relaves se restringirán al entorno inmediato de los rajos donde serán depositados y, por tanto, el impacto hacia las aguas subterráneas no es significativo.

Palabras Clave: evaluación ambiental, infiltración, velocidad de flujo, conceptualización, modelación.

Financiamiento: SRK Consulting.

Estudios hidrogeológicos y geofísicos realizados en la subsidencia de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile

Felipe Cristian Fuentes Carrasco¹, Cristóbal Machuca del Valle¹, Luis López¹, Cecilia Donoso¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)

Introducción

El evento de subsidencia ocurrido en la mina Alcaparrosa de Tierra Amarilla corresponde a una emergencia de carácter geológico-minera que ha sido el centro de atención de diversos actores, tanto de las comunidades cercanas como de entidades públicas y privadas. El hecho, ocurrido el 30 de julio de 2022, tuvo como principal consecuencia la formación de una cavidad cilíndrica en la superficie, que alcanzó 64 m de profundidad y 37 m de diámetro. Luego del suceso, se registró un aumento del caudal de agua al interior de la mina, el que colapsó los sistemas de bombeo de desagüe, que tenían una capacidad de 50 l/s. Los primeros monitoreos ambientales dan cuenta del aumento de hasta un 885% en la tasa de descenso en los pozos cercanos luego del evento y la formación de un cono de depresión en la superficie freática con centro en la subsidencia.

La Unidad de Hidrogeología del Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), junto con la Dirección Regional de Atacama, recopiló información y mediciones en terreno desde el 8 de agosto al 2 de septiembre, lo que incluyó el muestreo de aguas del acuífero del río Copiapó y aguas encontradas al interior de la mina. Mediante el análisis isotópico de las muestras fue posible determinar que las aguas presentes en los niveles 270, 200 y en los niveles inferiores de la mina, niveles hacia los cuales la empresa minera desvió el agua (entre las cotas 35 y 102 (m s.n.m.) aproximadamente, según lo reportado por la empresa minera al 20/10/2022), corresponden a una mezcla entre agua del acuífero y aguas que se encontraban previo a la subsidencia al interior de la mina.

Modelo Conceptual

Mediante el análisis de la información estructural, de los niveles piezométricos medidos en pozos, de hidrogeoquímica e isotopía del aguas subterráneas y superficiales y de métodos geofísicos de GPR y ERT, fue posible desarrollar un modelo conceptual temporal de las aguas subterráneas, anterior al evento y posterior a él, con lo que se logró identificar los efectos sobre el sistema hidrogeológico (Fig. 1).

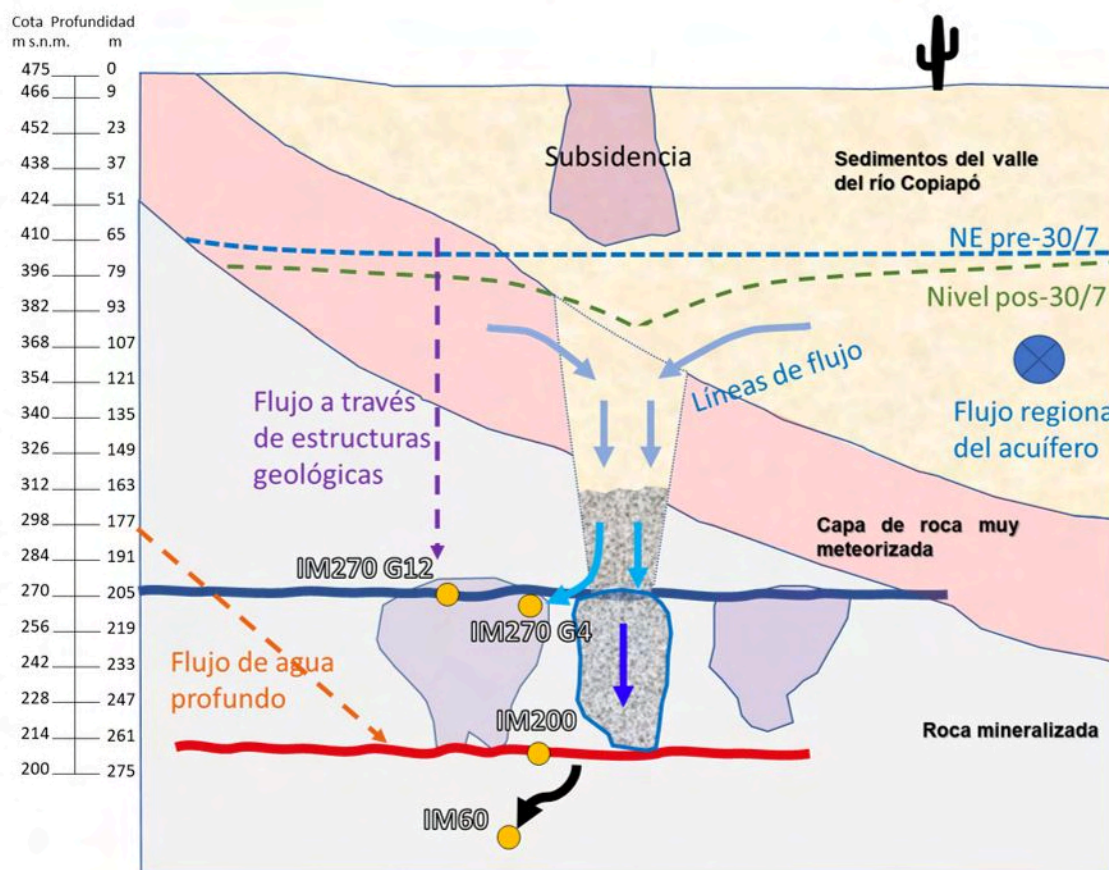


Figura 1. Modelo conceptual de la subsidencia visto en un perfil en vista hacia el Norte. (Fuentes et al., 2023).

El sistema, antes del evento de subsidencia, correspondía a uno donde la conexión hidráulica entre el acuífero y la mina estaba dada por numerosas estructuras geológicas que atraviesan la cobertura rocosa del caserón que alcanzaba los 105 m de espesor (Fig. 1). En este escenario, el flujo a través de las fallas era lo suficientemente lento para que el agua aumentara de forma considerable su salinidad y sufriera reacciones de oxidación y precipitación de minerales férricos. Por otro lado, las aguas conducidas por estructuras en los niveles profundos de la mina presentan una isotopía más pesada y evaporada, característica de las aguas encontradas al interior de la mina (Fig. 1).

Posterior al evento, se evidenció la formación de un cono de depresión centrado en la subsidencia, dado que la tasa de descenso del nivel piezométrico fue mayor en los pozos de observación que se encontraban más cercanos a la subsidencia. A partir de una modelación analítica fue posible estimar un flujo de entrada máximo entre 250 y 286 l/s, congruente con el promedio de 287 l/s calculado a partir de los volúmenes acumulados en el interior de la mina hasta la fecha. Este cambio en los niveles modificó la dirección del flujo regional, sobrepasando el caudal de aguas subterráneas disponibles en la sección del valle (Fig. 1).

Las aguas que ingresan continuamente por la nueva conexión hidráulica generada bajo la subsidencia aumentan su salinidad en la medida en que aumenta la profundidad, debido sobre todo a la disolución de yeso contenido en la roca fracturada y fragmentada al interior del caserón Gaby 4. Por medio de sondajes posteriores al evento, fue posible determinar que el nivel de sedimentos del acuífero se encuentra al menos 50 m más profundo que en la condición pre evento definida por el modelo geológico.

Finalmente, al acumularse en el fondo de la mina, las aguas ingresadas desde el acuífero se mezclan con las de circulación profunda, aumentan el tiempo de interacción con minerales sulfatados y sulfurados, y dan paso a reacciones de disolución y óxido-reducción, lo que termina por aumentar su salinidad y disminuir su pH. Mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el agua y los minerales sulfurados, se incrementa el riesgo de drenaje ácido y la subsecuente incorporación de metales pesados al agua.

Conclusiones

Mediante el análisis piezométrico fue posible establecer que el nivel freático del acuífero formó la geometría de un cono de depresión, cuyo vórtice se ubica sobre la subsidencia. Esto fue resultado de una extracción anormal de agua desde el acuífero a causa de una conexión hidráulica excepcional entre el acuífero y la mina Alcaparrosa en el lugar de la subsidencia. Dado que no se observó una estabilización de los descensos, se puede concluir que la extracción de agua superó la capacidad de aporte del acuífero, por lo que el cono de depresión continuó creciendo hasta que el efecto de la contención de los muros se registró en los niveles del piezómetro HA-02 el 19 de octubre de 2022.

Mediante datos analíticos se estimó que el caudal de ingreso a la mina luego del evento alcanzó un máximo de entre 250 y 286 l/s, y produjo un cono de depresión de un radio de 900 m, lo que es confirmado al evaluar los volúmenes acumulados al interior de la mina. De esta manera, considerando que al 14 de septiembre de 2022 ingresaron 1.236.411 m³ de agua a la mina, fue posible establecer un promedio de 287,37 l/s para el flujo en el periodo anterior a la construcción de los muros. De acuerdo con el caudal promedio y con los 32 días que demoró en registrarse la recuperación del nivel del acuífero como consecuencia de la construcción de los muros, fue posible determinar que el volumen embalsado en el sector Gaby alcanza los 857.507 m³. De esta forma, se considera que en el periodo entre la fecha del evento y el 31 de enero de 2023, se han extraído del acuífero 2.548.000 m³ de agua, de los cuales gran parte siguen almacenados en el nivel de acopio al interior de la mina. Dado que el caudal de ingreso actual duplica el del ingreso previo al evento, es importante evaluar el efecto que dicho aumento tendrá en la disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca, tanto en el mediano como en el largo plazo.

Por medio del monitoreo de parámetros de CE y pH, y del análisis isotópico e hidrogeoquímico del agua al interior de la mina, fue posible determinar que, posterior al evento, el agua proviene en un 85% aproximadamente desde el acuífero del río Copiapó, mientras que el 15% pertenece a aguas de circulación profunda. Por otra parte, a medida que el agua ingresa a la mina y desciende a los niveles más profundos, ocurren procesos hidrogeoquímicos que producen una salinización progresiva y una disminución sostenida del pH, especialmente en el nivel de acopio al interior de la mina. Estos procesos corresponden sobre todo a la disolución de sulfatos de calcio y magnesio (aumento de salinidad) y a reacción óxido-reducción de sulfuros (acidificación). Los procesos de acidificación y salinización de las aguas que ingresan a la mina predominan en el nivel de acopio en los niveles inferiores de ella y podrían deteriorar rápidamente la calidad del agua a medida que aumenta el tiempo de interacción con sulfuros de hierro y cobre. Mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el agua y los minerales sulfurados al interior de la mina, se incrementa el riesgo de contaminación por la incorporación de metales pesados al agua.

La existencia de zonas de transporte de fluidos desde el acuífero superficial hacia niveles inferiores de la mina en las cercanías de la zona de subsidencia fue inicialmente sugerida por las prospecciones geofísicas realizadas en el área de estudio (perfiles ERT y MASW, (Geodatos SAIC, Fuentes, *et al.*, 2023). Posteriormente, esta hipótesis fue confirmada mediante la comparación de la estratigrafía de los sondajes perforados antes y después del evento, a través de los cuales se evidenció la presencia de sedimentos no consolidados a una cota aproximada de 300 m s.n.m. justo por debajo de la subsidencia. Esto es consistente con un modelo de derrumbe progresivo del techo del caserón Gaby 4 producto de una sobreexcavación asociada a la presencia de cuñas de roca en el techo del caserón, y además al ingreso permanente de agua desde el acuífero a través de las estructuras mayores que servían como vías preferenciales de flujo (Sernageomin, 2023).

Según la información recopilada y levantada en terreno, fue posible establecer que, previo al evento, existía un flujo de agua cercano a 16 l/s a través de estructuras geológicas. Dicho caudal provenía desde el acuífero fluvio-aluvial asociado al río Copiapó, el cual, luego del colapso del caserón Gaby 4, aumentó significativamente debido al colapso del contacto roca / relleno. Esto se condice con la información geofísica que muestra que luego del evento se miden zonas de baja resistividad en el sector donde se produjo la subsidencia, las cuales no se habían registrado en estudios anteriores.

Recomendaciones

Para analizar la evolución del sistema hidrogeológico, se recomienda que la empresa minera mantenga medidas de monitoreo de niveles y de análisis hidrogeoquímicos con frecuencia diaria y semanal, respectivamente. Estos últimos deben contemplar el muestreo del acuífero en pozos de bombeo ubicados aguas abajo, al interior de la mina Alcaparrosa, en los niveles 270 y 200 y en los niveles inferiores de acopio de agua, y deben contemplar análisis químicos de elementos mayores, menores, trazas e incluir hierro ferroso y férrico.

Además, se recomienda evaluar, por medio de la actualización de los modelos numéricos, la proyección del caudal de ingreso a la mina en el futuro y su efecto en el balance hídrico local y regional, comparándolo con el escenario sin subsidencia documentado por los estudios existentes.

Por otra parte, se recomienda que la empresa minera continúe con los sondeos exploratorios desde la superficie, con el objetivo de determinar la extensión y geometría de la zona colapsada, asociable a las anomalías geofísicas observadas en los estudios realizados por la empresa minera y por el contratista Geodatos SAIC.

Finalmente, se recomienda evaluar obras de remediación permanentes adicionales a la construcción de los muros, con el objetivo de sellar la conexión hidráulica en el contacto entre la roca basal y el relleno sedimentario. Una vez finalizadas las obras de ingeniería, realizar un nuevo muestreo de calidad de agua, para evaluar si existe una contaminación de las aguas del acuífero del río Copiapó a causa de la mezcla con agua embalsada al interior de la mina.

Palabras Clave: Subsidencia, Socavón, Tierra Amarilla, Alcaparrosa, Emergencia geológica-minera.

Referencias:

- Fuentes, F.; Machuca, C.; López, L. Donoso, C. 2023. Caracterización hidrogeológica del área afectada por la subsidencia del 30 de julio de 2022 en la mina Alcaparrosa, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-23-104: 132 p. Santiago.
- Sernageomin, 2023. Informe de investigación accidente alto potencial, Alcaparrosa, 23 de marzo 2023. Departamento de Investigación de accidentes y sanciones, Subdirección Nacional de Minería. 37 p. Santiago.

Determinación de Parámetros Hidráulicos Sector El Churque Teck Carmen de Andacollo

René Salvador Fuenzalida Lagos¹, Marcelo Veloso Nilo¹, Hugo Suazo Cordova²

(1) Teck Carmen de Andacollo, Ingeniería Geomecánica, Hidrogeología, Andacollo, Chile

(2) Teck Resources Limited, Ingeniería Geotécnica, Hidrogeología, Santiago, Chile

El sector El Churque ubicado al sur área mina de Compañía Minera Carmen de Andacollo, corresponde a un área de interés hidrogeológico y geotécnico debido a su configuración geológico estructural, su ubicación espacial intermedia entre el depósito de relaves y el rajo Carmen de Andacollo y el gradiente hidráulico en dirección a la mina, esta condición lo convierte en un sitio particularmente importante para controlar los niveles freáticos y posibles aumentos en la presión de poros en el macizo rocoso.

Durante el año 2021 se confeccionaron 04 nuevos pozos de bombeo en este sector (PHB28, PHB29, PHB30 y PHB31) cuya profundidad aproximada es de 300 m bns, el objetivo principal consistió en disminuir y controlar la presión de poros en los taludes del sector sur del rajo, de manera de dar cumplimiento al desarrollo y profundización del rajo de acuerdo con el plan minero y evitar la ocurrencia de potenciales inestabilidades que comprometiesen la seguridad de la operación. En estos pozos se realizaron pruebas de bombeo con la finalidad de validar el tipo de acuífero, determinar parámetros hidráulicos (S: *coeficiente de almacenamiento* y T: *transmisibilidad*) y determinar los caudales de extracción.

Los registros de descenso y recuperación obtenidos de las pruebas de bombeo permitieron generar las gráficas que comparadas con las gráficas propuestas por Renard et al. (2009), en todos los casos se asemejan a un acuífero no confinado o *semiconfinado*, que es correspondiente con el modelo conceptual de Carmen de Andacollo (Veloso, et al. 2023).

Los parámetros hidráulicos fueron obtenidos a través de programa MJ Pumpit V.3 (2010) y validadas a través de las ecuaciones propuestas para acuíferos semiconfinados (FCIHS, 2009), e indican que todos los pozos presentan una *transmisibilidad* (T m²/s) muy similar, en el orden 10E+02 m²/s considerada moderada para medios fracturados o asociados a fallas mayores y, en cuanto a los *coeficientes de almacenamiento* (S) los resultados para los pozos PHB29, PHB30 y PHB31 son muy similares estando en el orden de 10E-05, sin embargo, para el caso del pozo PHB28 el registro de la prueba de gasto constante muestra un descenso leve y se puede observar en la gráfica que no alcanza su estabilización después de 24 horas de bombeo continuo, esta situación no permite establecer el coeficiente de almacenamiento. Cabe señalar que este pozo presentó muy bajos descensos durante las pruebas hidráulicas, lo cual podría ser explicado por una la configuración estructural donde está emplazado (Fuenzalida, 2022).

Respecto de los caudales de bombeo, el pozo PHB28 presentó el mayor caudal específico, mientras que los pozos PHB29, PHB30 y PHB31 presentaron valores similares de caudal específico. Esta situación parece lógica y coherente con las observaciones de terreno que indican que para el pozo PHB28 el caudal de bombeo podía ser mayor que el establecido para los otros pozos, así también el descenso en este pozo es menor que el obtenido en los otros pozos. Una situación contraria se puede observar para el pozo PHB29 donde el caudal extraído fue menor, sin embargo, el descenso fue mayor que en los otros pozos.

La operación de los pozos en forma continua desde el primer semestre del año 2022 genera una extracción aproximada de 20 L/s y ha permitido controlar y disminuir los niveles freáticos y controlar las presiones de poros en la pared sur del rajo Carmen de Andacollo.

Palabras Clave: Coeficiente de Almacenamiento, Transmisibilidad, Acuífero Semiconfinado.

Referencias:

- FCIHS, 2009 Hidrogeología Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Barcelona España.
- Fuenzalida, R., 2022. Estudio Hidrogeológico Sector El Churque. Trabajo de Memoria para Diplomado en Hidrología Subterránea. FCIHS 2022. Barcelona, España.
- MJ Pumpit V.3, 2010. Pumping Test Automatic Calibration. Barcelona, España.
- Renard, Ph., et al., 2009. Understanding Diagnostic Plots for Well-Test Interpretation. Hydrogeology Journal, 2009, vol. 17, no. 3, p. 589-600. Springer-Verlag.
- Veloso, M. Fuenzalida, R. Suazo, H. 2023. Modelo Hidrogeológico Conceptual Teck Carmen de Andacollo. XVI Congreso Geológico Chileno 2023, Santiago, Chile.

Depth-Dependent Hydraulic Conductivity to Improve Seepage Prediction to An Underground Mine

Manuel Gutiérrez Riquelme¹, Gonzalo Lagos Vera¹

(1) Itasca Chile SpA, Santiago

Introduction

Mineral resources on earth have been mined since many years ago, when ancient men saw the utility and the way to use the different metals to survive for their development. It was not until the industrial revolution that these resources started to be mined in a massive way thanks to technological advancements. Nowadays, large open pits and block/panel cave mines are the preferred mining methods for big copper porphyries.

These big mines are in constant challenge to develop different models (e.g., geological, structural, hydrogeological) with limited samples and tests that are interpreted and then extrapolated to great volumes of the rock mass, causing great uncertainty. However, with current techniques and knowledge it is possible to understand and address it.

The study case corresponds to an underground mine currently in exploitation, and a previously mined open pit, now used as a tailing's storage facility. The objective of the study was to estimate potential inflow rates into the underground mine, and to assess a possible hydraulic connection between the tailings of the open pit, and the underground infrastructure, causing groundwater flow into the latter.

Site Data and Conceptual Model

The study site corresponds to a copper and gold mine, consisting of an open pit and an underground mine. The latter started production in 2012 and currently uses the panel caving method.

Since 2018, the open pit mine has been used as a tailings storage facility (TSF). It is expected that the subsidence produced by the underground mine will interact with open pit slopes and its zone of relaxation (ZOR), causing a preferential flow through a higher permeability rock mass, which could allow water inflows from the TSF into the underground labors.

The mines in the study site are Au-Cu porphyry deposits, located within a fold belt structure, where northerly trending volcanic and sedimentary belts have experienced several episodes of intrusive volcanism. Surface geology primarily corresponds to sedimentary turbidites and volcanic/volcaniclastic geological units of the Ordovician, Silurian, or Devonian period. These units are overlain by Tertiary basalt flows and more recent Quaternary alluvial deposits, mostly along the major stream courses. The Au-Cu mineralization is associated with monzonite intrusive igneous rocks, accompanied by low grade alteration within Ordovician host rocks. Dominant regional structures consist of a series of roughly north striking faults and splays.

Four main hydrogeological units were defined based on the geological units: Quaternary alluvium, Tertiary basalt flows, Silurian sediments, and Ordovician volcanic and intrusive rocks. The main aquifers are located within fractured systems in the Tertiary basalt and in the structural zones within the underlying Silurian and Ordovician rocks. The extent of the fractured aquifer system is highly uncertain and depends on the connectivity of the fracture networks, and the occurrence of precipitates or clay infill in the fracture planes.

On site observations from the underground mine suggested an inflow rate of 0.1 L/s, based on measurements from four observation points. This value was initially used to define a target calibration inflow value of 1 L/s. Usually, inflow measurements in underground mines pose great difficulties due to access limitations. Measurements can only be made in-situ with appropriate access for technical staff, being unable to cover the total area of the underground mine. Tunnels and drifts are probably grouted, and seepage can occur in the rock/grouting interface (Kumar R. et al., 2021). Thus, it is very likely that although seepage observations to the cave zones suggest low inflows, real inflows may be higher due to the factors described.

An analytic estimation of the potential inflows into the underground mine was made using Darcy's formula. Calculations were made assuming a confined aquifer, and a homogeneous and isotropic system. The flow was calculated in the surface area of a cylinder, considering the radius of the caving zone, the radius of the fractured zone, the radius of influence, and the hydraulic conductivity of the fractured rock and surrounding rock. Minimum results over 1 L/s, are obtained by applying a constant gradient of 1 while higher gradients lead to flow rates up to almost 10 L/s. Thus, analytical calculations based on the current conceptual model (used in the numerical model), suggest inflows between 1 to 10 L/s depending on hydraulic gradient would be possible.

Available hydrogeological data consisted mainly of shallow bores from the groundwater monitoring network. No pore pressure data from the underground mine was available. The lack of underground monitoring data through vibrating wire piezometers (VWP) poses a significant limitation for the estimation of the piezometric vertical hydraulic gradients and the behavior of the groundwater at great depths.

A groundwater contour map was developed by data from a groundwater monitoring network consisting of numerous piezometers screened on different hydrogeological units. Recharge was estimated through a hydrological analysis. Spatial distribution of rainfall was defined using Thiessen polygons. An average of 5% of rainfall was considered to recharge the aquifer.

Numerical Model

Itasca has built two 3D groundwater numerical models for this study area in 2020 and 2021, respectively, being both developed with the numerical code MINEDW™ (Azrag et al., 1998; Itasca Denver, 2019), which uses a finite-element approach to simulate groundwater flow in both saturated and unsaturated domains. This software is capable of simulating the excavation of a pit by allowing the elevation of nodes to vary through time, and the underground mining setting a zone of relaxation (ZOR) based on the mining schedule. Being a finite element-based code, the model grid consists of triangular prism elements with variable horizontal and vertical sizes according to their location in the model domain. Thus, elements in the open pit, underground mine and fault zones areas are 15 to 16 m, and gradually increase their size to the boundaries of the model, reaching a maximum size length of 500 m horizontally and vertically.

In both models the open pit has been simulated since the start of the excavation in 1999 until 2012, when excavations stopped and deposition of tailings into the pit commenced. Underground mining started in 2013 and historical exploitation was incorporated until the end of the calibration period (June 2020 and June 2021 for the previous and latest model, respectively).

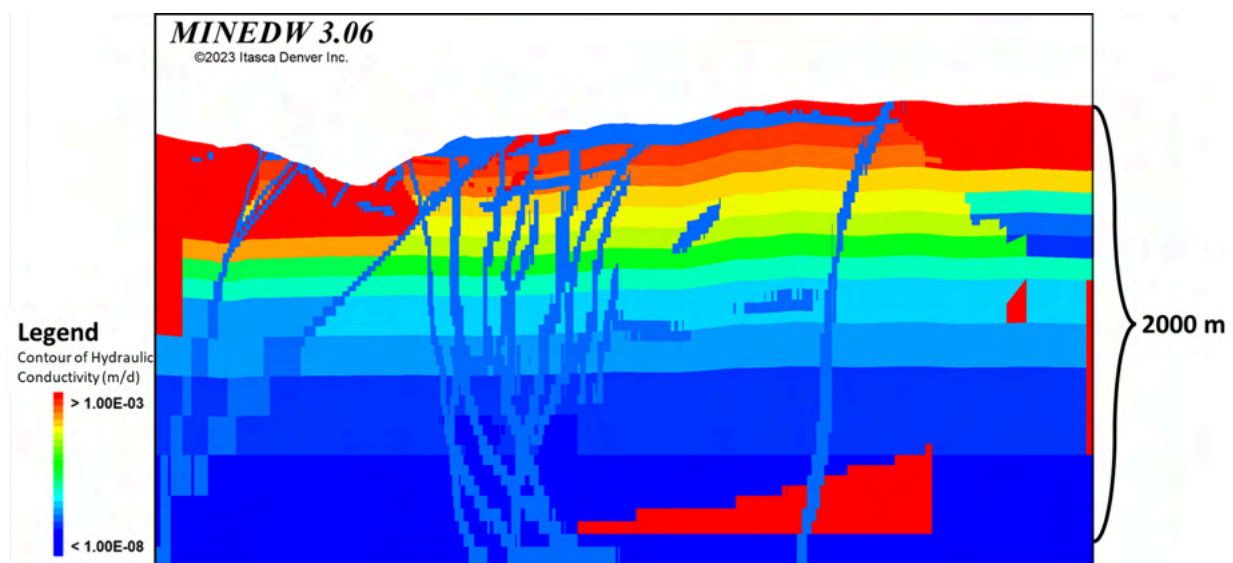
To represent the underground mine where a panel caving method is used as exploitation method, the approach for groundwater models is to use a drain boundary condition for the underground galleries where hydraulic pressure equals the atmospheric pressure, and due to the increase in fractures in the cave zone and the fractured zone produced by caving, a ZOR needs to be applied to represent this as an increase in hydraulic conductivity, using higher multipliers in the cave zone and a lower multipliers in the fracture limit.

Boundary conditions of both models were defined using information taken from the conceptual model. Groundwater of the study area flows from north to south as it is indicated by the piezometry and so two isolines were used as constant head boundary conditions in the model, one allowing flow to get into the model (North BC) and the other allowing flow to get out of the model (South BC). The other boundaries were defined as no-flow based on a local watersheds analysis. Also, recharge is applied in the first layer of the model as was defined in the conceptual model, considering 5% of the total precipitation for each station represented by Thiessen polygons.

The main difference between these models is related to the approach used for the hydraulic parameters of the hydrogeological units. In the first model, the same hydraulic parameters were used for the entire volume of each unit. In the second model, an approach of decreasing parameters in depth was applied, based on the definition made by different authors such as Beale & Read (2013) that proposes this is caused by the higher stress that occurs because of the lithostatic load.

Hydraulic conductivity values described in the conceptual model were obtained from in-situ hydraulic tests which represent local conditions, and due to the depth of each of these tests is really challenging to extrapolate values to greater depths where the underground mine galleries are located, which makes the conceptual and numerical models to be uncertain. Based on the experience from site and literature review, it can be concluded that for similar geological conditions, the hydraulic conductivity should be lower at higher depths than the one obtained from a shallower test.

With that approach applied only in the last model, calibration of both was performed in each corresponding year with its information, varying the hydraulic parameters (hydraulic conductivity, specific storage, and specific yield) according to the conceptual model and each definition. The hydraulic conductivity ranges from 5×10^{-3} m/d to 1×10^{-5} m/d in the first model, showing low dispersion of this parameter, while the latest model was calibrated with values from 1×10^{-2} m/d to 1×10^{-8} m/d, representing a higher heterogeneity and dispersion compared to the first model.



Contour of the hydraulic conductivity calibrated in the last model.

For equal comparison of the results obtained in the calibration process, in this paper the simulated values were obtained for the same calibration period and piezometers. This data was used to calculate calibration indexes and results show that both models were very similar, complying with recommended values of calibration from guidelines (Barnett et al, 2012; SEA, 2012). For example, SRMS and nMAE values are 8.3% and 6.1% in the first model, and for the last model, those indexes are 8.6% and 5.7%. These numbers may also indicate variations in adjustments from different piezometers.

Regarding flow rates, the differences between the different approaches started to become apparent. For the first model, a higher inflow rate was obtained, with an average inflow rate of 16.3 L/s for the calibration period, and the second model for the same period shows an average inflow rate of 1.7 L/s. This parameter can be quantified in the numerical model, but on the field this parameter might be difficult to register, due to the aforementioned reasons.

Simulations

At each corresponding year of the studies, once the numerical models were calibrated successfully, predictive simulations were carried out for the life of mine of the underground mine, simulating its growth until the year 2045, being evaluated the same mining plan in both models.

Simulated inflow rates into the underground mine in each model responds as expected due to the calibration values that were obtained, showing for the predictive period (January 2021 to December 2045) an average simulated inflow rate of 33.9 L/s in the case of the first model and 4.3 L/s for the latest model.

Each model provides deterministic results based on the calibration of hydraulic parameters, and for neither of the studies was developed an uncertainty analysis. One of the objectives of both studies was to analyze a potential hydraulic connection between the tailings in the open pit and the infiltration into the underground mine, resulting in both models that the predictive simulations indicate that there is no connection for the simulated period.

Conclusions

Based on the current conceptual understanding and available field data, both hydrogeological numerical models developed in MINEDW reasonably simulates past and current hydrogeological conditions of this mine site, therefore both models were used to conduct predictive simulations to obtain potential inflow rates into the underground labors and to achieve the different objectives of the study.

The modelled water levels of both models were similar in the calibration period, but the inflow rates differ, being for the latest model a 10% of the inflow obtained from the previous model, and for the predictive stage, that result maintains a difference of 13% of the inflow estimated previously, leading to compare the simulated values to the ones calculated with the empirical formulas, and so to understand that the previous model was potentially overestimating inflow rates, even if the groundwater levels were well calibrated.

Even considering the estimated conceptual inflows, which indicate that the latest model should result in a more precise estimation of future inflows, uncertainty will remain until more data can be obtained from field. It's necessary to improve the hydrogeological understanding of the study area, especially with a deeper hydraulic characterization of the hydrogeological units, developing new hydraulic tests to confirm or modify the hydrogeological conceptualization. Also, future fieldwork plans should include monitoring of groundwater levels using vibrating wire piezometers at different depths and locations.

Finally, it is important to remark that when using groundwater numerical models for this kind of simulations It is highly recommended to perform uncertainty analysis, using modern technics such as Space Null Monte Carlo analysis that helps to quantify uncertainty, proving ranges and probabilities for predictive results, that helps in the decision-making process.

Keywords: Uncertainty, Groundwater Flow, Numerical Modelling, Predictive Simulations, Deep Mining.

References:

- Azrag, E., Ugorets, V.I. & Atkinson, L.C. (1998). Use of a finite element code to model complex mine water problems. Proceedings of Symposium on Mine Water and Environmental Impacts. International Mine Water Association, Johannesburg.
- Barnett et al. (2012). Australian groundwater modelling guidelines, Waterlines report, National Water Commission, Canberra.
- Beale, G., Read, J. (2013). Guidelines for evaluating water in pit slope stability. CSIRO Publishing, Collingwood.
- Itasca Denver (2019). MINEDW Ver. 3.06. Denver: Itasca.
- Kumar R. et al. (2021). Water Seepage Mapping in an Underground Coal-Mine Barrier Using Self-potential and Electrical Resistivity Tomography.
- Servicio de Evaluación Ambiental, SEA. (2012) Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Santiago.
- Ugorets, V.I. (2015). Benefits of MINEDW Code for Mine Dewatering Projects in Complex Hydrogeological Settings. Proceedings of 4th Itasca Symposium on Applied Numerical Modelling. Lima.

Modelo Hidrogeológico Conceptual de los Acuíferos Costeros en Rocas Fracturadas: El Caso de Laguna Verde

Pedro Simunovic Dalannais¹⁻³, **Matías Taucare**¹⁻²⁻³, Denisse Toro Andrade¹⁻³, Benoît Viguière⁴, Ignacio Quiroga¹, Linda Daniele¹⁻²⁻³

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Centro Avanzado Para Tecnologías del Agua, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(4) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, Francia

Actualmente, Chile Central está experimentando un periodo de escasez hídrica debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas (Taucare et al., 2023), exacerbada por una prolongada sequía (Garreaud et al., 2017, 2019). Este contexto realza la necesidad de una eficiente gestión de los recursos hídricos subterráneos, la cual se fundamenta en un profundo entendimiento de los sistemas hidrogeológicos. Chile es un País montañoso, con ~ 6.000 km de costa, compuesto principalmente de rocas ígneas intrusivas y volcánicas. La zona costera ha presentado un importante crecimiento demográfico, lo que ha evidenciado las dificultades que tienen las ciudades litorales para asegurar el abastecimiento de agua potable, y el desconocimiento que se tiene del funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos en este sector. A pesar de estas dificultades, no se han realizado detallados estudios hidrogeológicos en acuíferos costeros que permitan garantizar el recurso hídrico subterráneo. Para abordar esta problemática, y con el objetivo de comprender el funcionamiento hidrodinámico en estos medios, se ha llevado a cabo un estudio hidrogeoquímico (parámetros fisicoquímicos, aniones, cationes, y elementos traza) e isotópico ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) a partir de 8 manantiales y 15 pozos, logrando desarrollar por primera vez un modelo conceptual de los sistemas hidrogeológicos costeros en medios no convencionales. El análisis se enfoca en Laguna Verde, en la Región de Valparaíso (~33°S), una Península compuesta por Dioritas, Gabros de Labradorita y Granitoides de edad Jurásica, fuertemente afectados por fallas de escala regional (Gana et al., 1996) bajo un clima Mediterráneo, con una precipitación anual ~500 mm/a.

Los resultados preliminares indican valores de conductividad eléctrica entre 341-5.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, temperaturas de 16-25°C, y valores de pH entre 6.41-8.1. La composición de las aguas subterráneas muestra un enriquecimiento de Cl^- y Na^+ desde las zonas topográficas más altas hacia el mar. Las facies hidrogeoquímicas $\text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+}$ están presentes hacia el continente, y las $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ dominan a lo largo de la línea de costa. Las muestras son agrupadas en 3 grupos al emplear un análisis de clúster jerárquico, los cuales se distribuyen a lo largo de la línea de costa, zona urbana y hacia las zonas más altas de la Cordillera de la Costa. Por su parte, el análisis factorial indica una fuerte incidencia del Na^+ , Cl^- , Br^- y HCO_3^- en la composición de las aguas subterráneas. Las relaciones iónicas sugieren que la disolución de plagioclasas explica parcialmente la composición de las aguas subterráneas de Laguna Verde. Las muestras de aguas subterráneas se tomaron a lo largo de toda la llanura costera, con distancias entre 5 - 4.500 m desde la línea de costa, y cotas entre los 10 - 300 m s.n.m. Dadas las características topográficas y climáticas de la red de muestreo, sumado a la piezometría del área de estudio, se considera que la niebla costera podría explicar el origen del Cl^- y Na^+ en la costa. Estudios recientes indican que el agua precipitada desde la niebla presenta valores de $\text{Na}^+ \sim 20,28 \text{ mg/L}$ y concentraciones de $\text{Cl}^- \sim 100 \text{ mg/L}$ (Fuentes et al., 2022).

Con los resultados preliminares obtenidos en este estudio, se puede indicar que las facies hidroquímicas de las aguas subterráneas en el medio costero estudiado son controladas fuertemente por el aporte de iones disueltos de la niebla costera. Este proceso parece estar directamente relacionado con la distancia que tienen los puntos de muestreo hacia la costa. Por otro lado, las aguas que son transportadas directamente a través de fracturas hacia la costa muestran patrones hidroquímicos diferentes, lo cual sugiere una conexión hidráulica compleja entre estos dos medios.

Palabras Clave: Acuíferos Costeros, Acuíferos Fracturados, Hidrogeoquímica, Isótopos Estables.

Financiamiento: Este trabajo es financiado por CAPTA-CORFO 19CTIGH-12134. Los estudios de Doctorado de Pedro Simunovic son financiados por ANID-Beca Doctorado Nacional/2021 21211312.

Agradecimientos: A Verónica Rodríguez y Erika Rojas, por los análisis químicos. A Antonio Delgado (CSIC Universidad de Granada), por el análisis isotópico. A la Dra. Cecilia Rivera, de la UPLA, por la ayuda logística.

Referencias:

- Gana, P., Wall, F., y Gutiérrez, A. (1996). Mapa Geológico del Área de Valparaíso-Curacaví. Regiones de Valparaíso y Metropolitana. SERNAGEOMIN, Subdirección de Geología. Mapas Geológicos N°1.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017) - The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D. (2019) - The Central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.*, 1–19 <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- Fuentes, B., Gómez, F., Valdez, C., Videla, A., Castro-Severyn, J., Barahona, S., Bol, R., Riquelme, R., Quispe, J., & Remonsellez, F. (2022). Effects of altitude on soil properties in coastal fog ecosystems in Morro Moreno National Park, Antofagasta, Chile. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13217. <https://doi.org/10.1111/ejss.13217>.

Modelo Hidrogeológico Conceptual Teck Carmen de Andacollo

Marcelo Veloso Nilo¹, René Fuenzalida Lagos¹, Hugo Suazo Cordoba²

(1) Teck Carmen de Andacollo
(2) Teck Resources Limited Chile

Resumen

Teck Carmen de Andacollo (CDA) está ubicado en el sector oriental de la Cordillera de la Costa, a unos 55 km al suroriente de la ciudad de La Serena, Región de Coquimbo. Al surponiente de la faena se emplaza una cadena de cerros que separa las cuencas del río Elqui, del río Hurtado y el sistema interfluvial costero Elqui-Limarí. El área de interés contempla casi la totalidad de las subcuencas de la cuenca hidrográfica de Andacollo.

Las características geológicas que se observan en el sector están marcadas por la intercalación de rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Quebrada Marquesa e intrusivos correspondientes al Batolito Tablalalume, todas ellas afectadas por diversos eventos tectónicos que controlan la configuración y distribución de dichas unidades, así como también la existencia de tres dominios estructurales principales que tienen un rol importante dentro del sistema hidrológico del sector. Basados en estas características y su combinación, además de las diferentes características hidráulicas, es que se pueden definir cinco unidades hidrogeológicas (UHs) presentes, siendo la UH-0 la más somera y la UH-4 (Fallas y fracturas) la más permeable (1.0E-06 m/s).

La gran cantidad de puntos de monitoreo en el distrito (262) permite conocer de manera clara el comportamiento piezométrico en el sector. Cabe mencionar que se ha identificado un sistema acuífero somero (libre) asociado al flujo subterráneo dentro de los depósitos sedimentarios y roca fuertemente meteorizada (UH-0) y un sistema profundo (semiconfinado a confinado) correspondiente al flujo en el macizo rocoso controlado por la presencia de fallas y fracturas, los cuales presentan un bajo grado de conectividad debido a la baja permeabilidad del macizo rocoso y las diferentes características hidráulicas que tienen las estructuras. La piezometría también da cuenta de un flujo subterráneo preferencial con dirección suroeste a noreste, concordante con la cuenca hidrográfica natural Andacollo. La presencia del rajo de CDA y su continua profundización cambia en el gradiente hidráulico natural, generando un “sumidero” local en el sistema profundo, con flujo radial apuntando al centro del rajo. Aumentos exponenciales en los caudales de extracción de los pozos de bombeo periféricos incrementan la extensión de dicho cono de depresión.

Los datos hidroquímicos disponibles muestran que las aguas, en los sectores aledaños a las instalaciones mineras, corresponden principalmente a aguas sulfatadas cálcicas, mientras que en las subcuencas ubicadas al este predominan las bicarbonatadas cálcicas. Por su parte en la zona sur del área de estudio se pueden observar aguas de ambos tipos. La composición isotópica de las muestras evidencia que la mayoría de las aguas subterráneas se distribuyen entre la línea de aguas meteóricas mundial LAMM y la línea de evaporación mina, corroborando efectos de evaporación en la zona de recarga, antes de alcanzar el sistema profundo, mientras que las aguas someras presentan una desviación respecto de las aguas meteóricas, debido al efecto de evaporación en la lámina libre. Las muestras históricas que caracterizan la laguna del depósito de relaves forman una recta distinta, la cual es considerada como la línea de evaporación de las aguas del depósito y sirve como referencia para identificar procesos de mezcla en los distintos sectores de monitoreo sistemático. Al sur de las instalaciones de CDA la composición isotópica de las muestras se ubican principalmente entre la línea de aguas meteóricas mundial y la línea de evaporación mina, indicando una recarga de origen meteórico, que en sectores alcanza a sufrir evaporación en la zona saturada antes de llegar al sistema de aguas subterráneas.

Las características hidroclimatológicas del sector controlan fuertemente el balance hídrico del área de estudio, ya que el clima semiárido, la variabilidad de temperatura y el bajo registro pluviométrico en la zona, hacen que la recarga natural del sistema sea prácticamente nula, no obstante, si se considera la tasa media anual de precipitación (142 mm), se genera una recarga natural de 10 L/s aproximadamente. Mediante modelamientos de balance de aguas en Goldsim se ha cuantificado una recarga antrópica promedio de 27 L/s, la cual puede presentar incrementos durante periodos con precipitaciones intensas. El caudal promedio de los pozos de bombeo es de 30 L/s, mientras que los afloramientos al interior del rajo bordean los 15 L/s promedio. Considerando las recargas y descargas antes descritas, nos vemos enfrentados a un acuífero que está en desbalance, es decir, tiene un déficit de recurso hídrico, el cual debe ser controlado y así evitar el stress del sistema.

Palabras Clave: Modelo Conceptual, Medio Fracturados, Hidrogeología, Andacollo.

Referencias:

- Emparan & Pineda, 2006. Geología del Área Andacollo – Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, Escala 1:100. 000.
- FCIHS, 2009 Hidrogeología Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Barcelona, España.
- Veloso M, Araya V, Fuenzalida R, Schmidt R, 2015. Geología Estructural en Teck Carmen de Andacollo.
- WSP, 2023. Actualización Modelo Hidrogeológico Conceptual Teck Carmen de Andacollo.

Evidencias e Implicancias del Acoplamiento Hidromecánico en Rajos Abiertos de Codelco

Javier Verdejo¹, Luis Olivares¹

(1) Codelco, Gerencia Corporativa Geociencias, Santiago, Chile

El desarrollo de la minería de cobre se realiza principalmente en macizos rocosos que presentan distintas litologías, tipos de alteración y grados de fracturamiento, generando sistemas hidráulicamente heterogéneos. Uno de los grandes desafíos de la minería a rajo abierto es mantener la estabilidad de los taludes a medida que avanza la excavación.

La resistencia al corte del macizo rocoso está definida por el esfuerzo efectivo que actúa sobre éste. En términos generales, el esfuerzo efectivo corresponde a la diferencia entre el esfuerzo total que genera la carga litostática versus la presión de poro generada por el agua almacenada.

A medida que se excava un rajo, la descarga litostática disminuye el esfuerzo total sobre el macizo rocoso. Este desconfinamiento genera un aumento en la porosidad secundaria de las rocas que componen el macizo, aumentando la capacidad de almacenamiento, y por tanto disminuyendo la presión de poro. En casos que el ingreso de flujo de agua permite recargar el sistema, la presión de poro se mantendrá y/o aumentará, disminuyendo el esfuerzo efectivo en el macizo rocoso. En caso contrario, si el ingreso de flujo demora o simplemente no ocurre dentro del periodo de excavación del rajo, la presión de poro se mantendrá deprimida, aumentando el esfuerzo efectivo, y por tanto la resistencia al corte del macizo rocoso. Este fenómeno se conoce como acoplamiento hidromecánico.

El análisis de las presiones de poro durante el avance de la excavación es clave para identificar la respuesta del macizo rocoso al acoplamiento hidromecánico. La identificación de las unidades de rocas acopladas permitirá mejorar las estimaciones de niveles piezométricos y campos de presión de poro simulados, los cuales son utilizados en análisis de estabilidad de taludes. Los resultados de estos análisis son claves para la identificación y conceptualización respecto a la necesidad de medidas de despresurización. No considerar la respuesta acoplada del macizo en simulaciones de análisis de estabilidad, puede generar una sobrestimación de la presión de poro considerada y por tanto de los sistemas de drenaje, así como ángulos de talud más conservadores perjudicando el negocio minero.

En este trabajo se presentan registros de piezómetros con evidencias de acoplamiento hidromecánico, recopilados en distintos tipos de rocas desde cuatro rajes abiertos de Codelco. Se analiza la información geológica, geotécnica e hidrogeológica disponible y su correlación con el fenómeno de acoplamiento. Para finalizar se discuten implicancias del oportuno reconocimiento de las unidades de rocas que presentan acoplamiento hidromecánico, buenas prácticas para el seguimiento de los registros, así como próximos pasos y optimizaciones a desarrollar para mejorar el entendimiento y representación de las unidades acopladas.

Palabras Clave: Acoplamiento Hidromecánico, Presión de Poro, Conductividad Hidráulica, Macizos Rocosos.

Génesis y ocurrencia de litio en el Salar de Tara, San Pedro de Atacama, provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile

Sebastián Arra Lusetti¹, Julietta Zamora Tapia¹

(1) Universidad del Desarrollo, Ingeniería, Av. La Plaza 700, Santiago de Chile, Chile

El litio se ha convertido en un mineral con un alto valor estratégico. En la actualidad estamos en medio de un proceso global que corresponde a la transición energética para poder lograr la apreciada descarbonización, la cual se prevé que no será posible, si no se logra asegurar el suministro del metal en el mediano y largo plazo.

En la actualidad las reservas de litio contenido en salmueras y su producción está concentrada en unos pocos países, siendo Chile uno de los protagonistas con una de las mayores reservas en el Salar de Atacama. En un estudio del año 2013, Sernageomin menciona que Chile cuenta con un potencial geológico privilegiado para la explotación del litio: 63 ambientes salinos (45 salares y 18 lagunas salinas) de características físico-químicas e hidrogeológicas diversas, estos salares son de interés por su potencial geológico para albergar proyectos de litio. (Estrategia nacional del Litio, 2023).

El presente trabajo técnico se llevó a cabo con el fin de comprender las características geológicas, geoquímicas y geofísicas del proyecto minero Eliana, localizado en el sector sur de la cuenca tripartita de Zapaleri, dentro de los confines del Salar de Tara, al este de la Región de Antofagasta, Chile, aproximadamente a 190 km de la ciudad de Calama. La propiedad minera (55,3 km²) fue concesionada a Sorcia Minerals Spa.

Los objetivos específicos de la campaña fueron realizar una grilla de muestreo geoquímico, determinar posibles zonas de recarga y caracterizar la geología superficial y a profundidad de la cuenca. La configuración geológica de la cuenca Zapaleri está controlada por una arquitectura de faja plegada y corrida (que se desarrolla hacia el sector argentino), fallamiento compresivo de carácter regional, de vergencia al este, pone en contacto y pliega unidades ordovícicas y cretácicas. Sobre este alineamiento, se emplaza un cordón montañoso/volcánico descrito como complejo volcánico Poquis de composición calco-alcalino y de rumbo norte-sur (Seggiano, R. et al. 2015). A su vez, se desarrolla una secuencia de fallas normales del tipo hemigraben que condicionan la geometría del Salar de Tara. Por otro lado, afloramientos masivos de ignimbritas dacíticas, pertenecientes al grupo de Ignimbritas Atana, cubren la mayor parte de la superficie del terreno periférico al Salar. Depósitos sedimentarios del tipo aluvial y lacustre se encuentran rellenando la cuenca, la composición es principalmente terrígeno - orgánico, y el desarrollo de una costra salina es casi inexistente (exceptuando la costa sureste). Un cuerpo de agua permanente de morfología elongada se localiza en el sector más deprimido de la cuenca, con una química del agua (salmuera) tipo NaCl. Por último, el Salar de Tara corresponde a una laguna altiplánica de tipo andino.

Se realizó la campaña exploratoria, utilizando geofísica (métodos TEM y MT) y geoquímica (determinación de la concentración de elementos químicos, como litio, en la salmuera, roca y sedimento tipo arena dentro de la laguna). La metodología consistió en un trabajo en paralelo con el equipo geofísico, geoquímico y geológico. El sector sureste de la laguna es el único lugar donde se desarrolla una costra salina permanente, por lo que se enfocó y concentró la toma de muestras aquí, aunque sí se tomaron muestras geoquímicas en otros lugares de la laguna y sectores aledaños.

Los resultados obtenidos son optimistas para la futura explotación del proyecto. La geofísica entregó información de la existencia de un acuífero con salmuera a profundidad (300 metros) que puede contener concentraciones importantes de Li disuelto (Geo Resources Ltda, 2023). Los resultados de laboratorio sobre el muestreo geoquímico indicaron concentraciones promedio de 798,8 ppm de Li y 5.551 ppm de K para las muestras de solución, 382 ppm de Li y 1.322 ppm de As para los depósitos no consolidados (tipo arena y arcilla) dentro de la laguna y, por último, se analizó las concentraciones de Li en las rocas volcánicas y piroclásticas aflorantes en el sector, pero son despreciables. A su vez, se analizaron ciertos parámetros del agua (como pH, temperatura y TDS) lo que permitió identificar una zona de recarga con agua dulce hacia el sector sureste de la laguna. Sin embargo, el río Zapaleri es la principal fuente de agua dulce hacia la laguna (200 l/s).

Como el proyecto tiene potencial minero, se debe a la vez realizar un levantamiento de línea base, para estudio de biodiversidad con la autorización y apoyo de los pueblos originarios.

Palabras Clave: Exploración de Litio, Salar de Tara, Geoquímica, Geofísica.

Referencias:

- Alfaro, M.; Rojas, N., 2017. Technical Report of the Litarsa Properties, NI 43-101, Angelita and Papadopolus LVII Salta Province, Argentina. vol 1.
- De la Hoz, G.M., 2021, Genesis of lithium. June 30, 2021, Conference presentation. Specialization course Geosciences and Lithium Technologies Program. UNLP – UNJu. Argentina. No publicado.
- García M.G.; Borda L.G.; Godfrey L.V.; López R.L.; Losada A., 2020. Characterization of lithium cycling in the Salar de Olaroz, Central Andes, using a geochemical and isotopic approach. Chemical Geology. pp 1-10.
- Geo Resource Ltda, 2023. Estudio Hidrogeológico Salar de Tara, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. vol 1. pp 1-64.
- Gobierno de Chile, 2023. Estrategia Nacional del Litio.
- Grosse P.; Guzmán S.; Petrinovic I., 2017. Volcanes Compuestos Cenozoicos del Noroeste Argentino. Ciencia de la tierra y recursos naturales del NOA. pp 1-10.
- Seggiano, R.; Becchio, R.; Bercheff, V.; Ramallo, L., 2015. Hoja Geológica 2366-III Susques, provincias de Jujuy y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N°414, pp 103. Buenos Aires, Argentina.

Evaluación del impacto de la explotación del Litio y el cambio climático en la interfaz salina del Salar de Atacama mediante herramientas de modelación numérica

Claudio Ávila¹, María Pool¹, Luciano Achurra¹, Beatriz Olivares²

(1) Amphos 21 Consulting Chile Ltda.

(2) Codelco, Gerencia Corporativa de Agua

Los salares Altoandinos del norte de Chile son de gran interés económico debido a sus altas concentraciones de litio, potasio y boro disueltos en la salmuera, que se utilizan en la fabricación de baterías recargables y otros productos. En particular, el Salar de Atacama es uno de los yacimientos con mayores reservas de litio a nivel mundial. Dicho Salar se encuentra en un constante foco de estudio debido a que en él la explotación se debe compatibilizar con el resguardo de importantes sistemas lagunares que se desarrollan en los bordes del Salar (Zona Marginal), ya que tienen una relevancia ambiental debido a su biodiversidad, su relación con el patrimonio cultural y como puntos de gran interés turístico en la región.

En sistemas de Salares el flujo subterráneo es complejo y está fuertemente influenciado por la diferencia de densidad de los fluidos que coexisten en el mismo (agua dulce – salmuera). En la zona limítrofe del Núcleo, se encuentra en profundidad una zona de mezcla (interfaz) por encima de la cual el agua dulce flota sobre la salmuera y descarga formando los sistemas lagunares. El control sobre la estabilidad química de dicha interfaz así como su movimiento es clave para la preservación de los ecosistemas asociados a dichos sistemas lagunares.

Actualmente, los modelos numéricos se presentan como la herramienta fundamental para la integración, el entendimiento y la predicción de procesos de aguas subterráneas en hidrogeología. Entre los trabajos realizados en el Salar, Amphos 21 en colaboración con CORFO, elaboró una serie de modelos numéricos de la cuenca del Salar de Atacama. El ejercicio numérico consistió en la construcción de un modelo de flujo 3D a escala de cuenca y 3 modelos numéricos 2D de flujo con densidad variable en los sectores de interés medioambiental de Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava. Una vez calibrados los modelos numéricos, se utilizaron como herramienta numérica predictiva simulando una serie de escenarios futuros con el objetivo de cuantificar el potencial impacto de los planes de extracción y posibles efectos del cambio climático. Los resultados obtenidos evidenciaron un efecto potencial de modificar la distribución de las concentraciones, desplazando la interfaz salina en la Zona Marginal.

No obstante, estos modelos numéricos son una simplificación de un sistema hidrogeológico complejo y, por lo tanto, conllevan siempre un grado de incertidumbre debido a la disponibilidad de información y calidad de la misma previa a la definición del modelo, así como en la definición de sus condiciones de borde y parametrización. Por lo tanto, para alcanzar un mayor entendimiento de estos sistemas y poder diseñar planes de gestión sostenible y evaluar futuros impactos en áreas de interés medioambiental, es necesario levantar más información en el sector, incluyendo trabajos de terreno (geofísica, ensayos hidráulicos, etc.), así como un monitoreo continuo de niveles, calidad de las aguas subterráneas y distribución de la conductividad eléctrica en pozos debidamente diseñados para estos fines.

Palabras Clave: Salar de Atacama, Interfaz Salina, Modelación numérica.

Financiamiento: Unidad Técnica para Contratos de Litio de CORFO.

Agradecimientos: Unidad Técnica para Contratos de Litio de CORFO.

Referencias:

- Amphos 21. 2021. Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama. Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico.

Geoquímica y potencial de litio de salares andinos de las regiones de Antofagasta y Atacama: La Isla, Pajonales, Las Parinas y Aguilar

Nicolás Eduardo Cádiz Trejos¹, Rodrigo Carrasco¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Departamento de Geología Aplicada (DGA), Unidad de Recursos Minerales (URM), Santa María 104 Providencia, Santiago, Chile

Los estudios efectuados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) en los salares del norte de Chile, a partir de la década del 2000, han permitido avanzar sustancialmente en el conocimiento, de uso público, respecto a los salares pre-andinos y andinos, ubicados entre las regiones de Arica y Parinacota y Atacama (18 y 27°S). La geología, la geomorfología y el clima son los 3 factores más importantes que hacen posible que en toda esta zona se ubiquen más de 50 sistemas salinos dentro de los cuales se encuentran salares y lagunas salinas. Hoy en día el foco está centrado en los salares a causa del Li, elemento que se encuentra en grandes cantidades en los salares pre-andinos y andinos, por la creciente demanda de la industria de las tecnologías y la electromovilidad, principalmente en la fabricación de baterías eléctricas de alto rendimiento.

La Unidad de Recursos Minerales (URM) de Sernageomin, entre los años 2018-2022 realizó varios estudios dirigidos a generar conocimiento y dejar a disposición información actualizada respecto de las características geológicas, hidrogeológicas, geofísicas, geoquímicas de estos salares, además de conocer la distribución de sus recursos minerales contenidos y determinar el potencial económico de éstos. En concordancia con estudios previos que priorizaron según su potencial, los estudios de salares en las regiones de Antofagasta y Atacama (Troncoso *et al.*, 2013 y Sernageomin-CMNM, 2017), se trabajó en 4 salares andinos: Pajonales (Carrasco y Cádiz, 2020), en la región de Antofagasta, y La Isla, Las Parinas y Aguilar (Carrasco y Cádiz, 2019, 2021 y 2022) en la región de Atacama.

Estos estudios se basaron tanto en datos analíticos recopilados de Sernageomin (Troncoso *et al.*, 2013 y Troncoso y Ercilla, 2016), como también en campañas de terreno donde se obtuvieron más datos geoquímicos de costra salina y salmueras. Sumado a lo anterior, también se realizaron campañas de prospección geofísica para estimar el volumen del relleno salino de la cuenca. A partir de las metodologías de Houston *et al.* (2011) y los datos obtenidos, se realizó una estimación de recursos potenciales, además de una caracterización geoquímica e hidroquímica de cada salar en particular. Los resultados obtenidos corresponden a la suma de los recursos de Li tanto de la costra salina como de la salmuera, siendo el salar con mayor potencial económico La Isla (Li: 912.340 t / LCE: 4.853.649 t), seguido por Aguilar (Li: 286.946 / LCE: 1.526.552 t), Las Parinas (Li: 95.262 t / LCE: 506.794 t) y finalmente Pajonales (Li: 91.958 t / LCE: 489.218 t).

Palabras Clave: Litio, Salares, Geoquímica, Potencial Económico.

Referencias:

- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2019. Potencial de litio en el salar de La Isla, Región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-74: 95 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2020. Potencial de litio en el salar de Pajonales, región de Antofagasta, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-85: 95 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2021. Potencial de litio en el salar de Las Parinas, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-94: 88 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2022. Potencial de litio en el salar de Aguilar, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-101: 100 p. Santiago.
- Houston, J.; Butcher, A.; Ehren, P.; Evans, K.; Godfrey, L. 2011. The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology* 106: 1225-1239.
- Servicio Nacional de Geología y Minería-Comité de Minería No Metálica (Sernageomin-CMNM). 2017. Priorización de salares del norte de Chile con relación a su potencial en litio: resultados del taller de trabajo Sernageomin-CMNM, 10 de enero 2017. Servicio Nacional de Geología y Minería-Comité de Minería No Metálica, Documento Interno (Inédito), SNGM-1000-QA-001/CMNM-REP-GC-002: 35 p. un anexo.
- Troncoso, R.; Ercilla, O.; Carrasco, R.; Vivallo, W. 2013. Estudio del Potencial de litio en Salares del Norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado, IR-13-55: 251 p.
- Troncoso, R.; Ercilla, O. 2016. Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos (22°50'-26°05'S), Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-65: 427 p., 2 vols. Santiago.

Análisis de deformación superficial en el Salar de Atacama por medio de InSAR

Joaquín Castillo Rojas¹, Francisco Delgado¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 203, Santiago, Chile

La cuenca endorreica del Salar de Atacama concentra uno de los reservorios de salmueras continental de mayor ley de litio en el mundo, y constituye el mayor productor de este mineral crítico vía extracción de salmueras a nivel global (USGS, 2023). La sobre extracción de aguas subterráneas y salmuera gatilla un desequilibrio directo en la hidrodinámica natural del salar (Marazuela et al., 2019).

En particular se ha observado una disminución de hasta 10 m en algunos pozos de monitoreo en el núcleo de halita circunscritos a zonas de extracción debido a la actividad de la minería no metálica dentro del salar. Se puede producir subsidencia en superficie debido a la pérdida de agua y/o compactación del acuífero. Por lo tanto, este estudio analiza la deformación de la superficie del Salar de Atacama mediante Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), en la cual se pueden observar señales principalmente de subsidencia dentro del campo de pozos de extracción. El análisis geodésico se lleva a cabo por medio de series de tiempo entre 2014 y 2023 con imágenes Sentinel-1, y entre 2015-2022 con ALOS-2 stripmap. Los datos de InSAR muestran subsidencia de hasta 1 cm/año en el flanco SW del núcleo del Salar de Atacama entre 2019-2022 al menos en dos sectores circunscritos al campo de extracción de salmueras, como señales transientes de extensión NS aproximadas de 8 km.

Paralelamente, saltos de fase entre zonas con y sin arcillas en respuesta al swelling de éstas, como también el crecimiento de la costra de sal generan cambios en la fase interferométrica de las imágenes procesadas en periodos de tiempo donde se tiene registro de precipitaciones de hasta 50 mm en el Salar.

De esta manera, se hace una caracterización mineralógica por medio de XRD en muestras de suelo donde se observan estos saltos de fase, probablemente asociados a cambios en la humedad relativa del suelo y a procesos de hinchazón de arcillas (Mira et al., 2021). La alta resolución temporal en la adquisición de imágenes Sentinel-1, es utilizada como potencial herramienta de estudio de humedad relativa en la superficie.

Asimismo, la relación entre los resultados de XRD y los cambios en la fase interferométrica, proporcionan una línea base de primer orden en cuanto al rol de cierto tipo de arcillas en la humedad superficial del sala, que puede ser observada por pérdidas de coherencia en imágenes SAR de banda C (Ullmann et al., 2023).

Una comparación entre datos de banda C y banda L indica que la señal de los radares satelitales es sensible al crecimiento de la costra de sal, resultando en un salto de fase en banda C, pero menos claro en banda L. Estos saltos de fase son consistentes entre las series de tiempo Sentinel-1 y ALOS-2, tanto para los cambios en respuesta a procesos de hinchazón de arcillas, como también a las señales de subsidencia observadas en la superficie.

Palabras Clave: InSAR, Salar de Atacama, subsidencia, arcillas.

Financiamiento: Fondecyt de Iniciación 11220513. Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID).

Referencias:

- Jaskula, B. (2023). Mineral commodity summaries: Lithium USGS. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf>.
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. *Science of the Total Environment*, 654, 1118-1131.
- Mira, N. C., Catalão, J., Nico, G., & Mateus, P. (2021). Soil moisture estimation using atmospherically corrected C-band InSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-9.
- Ullmann, T., Jagdhuber, T., Hoffmeister, D., May, S. M., Baumhauer, R., & Bubenzer, O. (2023). Exploring Sentinel-1 backscatter time series over the Atacama Desert (Chile) for seasonal dynamics of surface soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113413.

Modelo Hidrogeológico del sector sur del Salar de Maricunga para la Comunidad Colla El Bolo

Mariana Cervetto¹

(1) HGA SpA, Santiago, Chile

El Salar de Maricunga representa gran interés económico debido a las altas concentraciones de litio, potasio y otras sales que reportan para las salmueras alojadas en acuíferos del salar debido a un aumento progresivo en la demanda en el marco de la electromovilidad y la transición energética para el almacenamiento de energía en baterías de ion de litio. Existen dos proyectos que cuentan con una Resolución de Calificación Ambiental favorable para explotar las salmueras concentradas en litio, y se ejecutan hoy campañas de exploración que lleva a cabo la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) y otros proyectos en etapas de desarrollo.

Las nacientes de la quebrada de Paipote y el Salar de Maricunga son territorios del Pueblo Colla. La laguna Santa Rosa se ubica al sur del salar y es parte del Sitio Ramsar Complejo Lacustre Laguna del Negro Francisco y Laguna Santa Rosa, que a su vez pertenecen al Parque Nevado Tres Cruces. La Comunidad Colla El Bolo solicitó apoyo para la generación de una línea base medioambiental y un modelo hidrogeológico del sur del salar, dada la inexistencia de antecedentes para este sector, y a que no están convencidos que los modelos que generaron las empresas sean capaces de esclarecer los potenciales efectos del bombeo de salmuera sobre los sistemas lacustres del salar. Estiman que un modelo hidrogeológico permitiría determinar con mayor certeza si habrá o no impactos sobre los componentes ambientales sensibles y específicamente sobre el normal funcionamiento de la laguna Santa Rosa.

Las comunidades no cuentan con recursos para financiar asesorías o estudios para disminuir la incertidumbre con respecto a potenciales impactos de la minería en sus territorios, quedando en desventaja para la generación de conocimiento y acceso a la información disponible. De esta manera se propuso abordar el requerimiento por etapas progresivas, partiendo por los que se pudieran levantar a partir de actos de cooperación, colaboración y menor financiamiento. Para la primera etapa se propuso levantar información para caracterización de línea base, hidrología, hidroquímica, prospección geofísica, sondeos y pruebas de bombeo, análisis de RCA vigentes e implementación sistema de monitoreo comunitario.

Se encargaron tres tesis de grado para dar inicio al proyecto. Una se enfocó a construir una línea base hidroquímica orientada a dilucidar el origen de las aguas que usa la Comunidad Colla El Bolo y su relación con la cuenca del Salar de Maricunga. Se elaboró un modelo conceptual esquemático para explicar el funcionamiento del sistema hidrogeológico Quebrada de Paipote-Salar de Maricunga. Un segundo estudio presenta el monitoreo espacio-temporal de parámetros de temperatura superficial, calidad de la vegetación, humedad del suelo y cuerpos de agua para el sector del Salar de Maricunga, a través de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), con el fin generar una base de datos espacial. El tercer estudio realizó un análisis de las RCA vigentes para proyectos de litio en el Salar de Maricunga con el objetivo de proponer un Plan de Monitoreo preliminar enfocado a la conservación de la Laguna Santa Rosa y otros puntos críticos de importancia para la comunidad.

Las tesis han aportado conocimiento a la comunidad, sin embargo la escasez de datos para este sector del salar aun genera incertidumbre del funcionamiento hidrogeológico del sector sur, a pesar de los avances realizados con estos estudios. De esta manera, la comunidad debe buscar nuevas formas para levantar nuevos antecedentes que permitan avanzar en la construcción del modelo, considerando además que las empresas no transparentan todos sus datos y monitoreos que pudieran aportar al modelo.

En base al diagnóstico de esta experiencia, se definirán mecanismos y recomendaciones para Pueblos Originarios y la comunidad en general, para poder acceder a herramientas que aporten a disminuir la brecha para la generación de conocimiento, traducir la información que generan las empresas que es ilegible para la mayoría de la comunidad, capacitar en aspectos técnicos, realizar observaciones a los EIA, generar antecedentes para procesos judiciales, entre otras que les permite hacer frente a la desventaja técnica que limita la posibilidad de actuar como contraparte, identificar potenciales impactos y velar por el resguardo del territorio.

Palabras Clave: modelo hidrogeológico, litio, salar, pueblos originarios.

Agradecimientos: A Elena, y a Alejandro Bordeu, Lican Guzmán y Bárbara Cornejo por prestar sus conocimientos y esfuerzos al servicio de la Comunidad Colla El Bolo.

Geología, Geofísica y Campaña de Perforación en el Proyecto de salmueras de litio “Sal de Vida”, Provincia de Catamarca – Argentina

Damián F. Moreno¹, Juan Delgado¹

(1) Allkem – Galaxy – Sal de Vida Project, M. Medina 17, SFV Catamarca – Argentina – CP 4700

La cuenca del salar del Hombre Muerto se encuentra dividida en dos subcuencas claramente definidas: una oriental y la otra occidental, siendo su delimitación orográfica la sierra de Farallón Catal. Estas subcuencas muestran marcadas diferencias tanto en su composición litológica como en la naturaleza de sus depósitos. La subcuenca oriental se caracteriza por ser de tipo boratífera y de bajo contenido de cloruros; en contraste con la subcuenca occidental que exhibe un elevado contenido de cloruros y un menor contenido de boratos. Con el objetivo de profundizar en el entendimiento de la forma de la cuenca, el análisis de su estratigrafía y la comprensión de la secuencia de deposición, se llevaron a cabo diversos estudios geofísicos en el marco del proyecto Sal de Vida a partir del año 2021. Estos estudios fueron diseñados específicamente para estimar la geometría del basamento ígneo en la parte superior de la cuenca, usando el método de Inversión Magnética. Además, se desarrolló un modelo tridimensional detallado de la cuenca para determinar los reservorios de litio mediante el método de la Quimioestratigrafía y para investigar estructuras geológicas, así como detectar salmueras portadoras de litio utilizando el método geofísico CSAMT.

La inversión magnética implica obtener información sobre la susceptibilidad magnética de las rocas durante el proceso, modificando una celda del modelo en términos de propiedades petrofísicas y geometría dentro de un rango determinado. Para ello se emplearon datos geológicos disponibles, como datos de pozos y mediciones de susceptibilidad, con el propósito de generar un modelo geológico. Este modelo se basó en datos de 40 pozos, topografía de detalle, afloramientos de roca y estudios de sondeos eléctricos verticales. Se realizaron, además, mediciones de susceptibilidad magnética en zonas de interés y muestreos de rocas, y se asignaron valores de susceptibilidad a las unidades litológicas utilizando una distribución normal con media y desviación estándar. El proceso iterativo ajusta el modelo para lograr una mejor configuración respecto a los datos magnéticos observados.

El trabajo quimioestratigráfico consistió en analizar los datos de control geológico de los pozos, digitalizándolos y cargándolos para su uso en el modelado 3D. Se redujeron las 34 facies descritas en el control geológico a cinco principales: gravas, arenas, limo-arcilla, evaporitas y vulcanitas, agrupadas en función de su granulometría y origen. Se usaron estos datos en la generación del modelo, que incluyó información recopilada de pozos perforados y estudios de magnetometría. También se cargaron las superficies interpretadas del basamento cristalino, el basamento económico terciario y la topografía de la superficie del salar.

El método CSAMT (Audiomagnetotelúrico de fuente controlada) proporciona información sobre la resistividad del subsuelo, estrechamente relacionada con la geología. Los factores clave que influyen en la resistividad son porosidad, contenido de fluido y algunos tipos de asociaciones minerales. En un proyecto que cubrió 120 km², se registraron 14 líneas con un total de 186 puntos de sondeo. Los resultados mostraron resistividades en las zonas de interés, es decir en los acuíferos de salmuera, en un rango de 0,3 – 0,8 ohm/m, permitiendo analizar espesores de sedimentos permeables y la estructura del subsuelo, incluida la profundidad del basamento de la cuenca.

Basándose en los hallazgos de los 3 estudios y la experiencia en campañas de perforación anteriores, se identificaron sectores de alto potencial para la extracción de salmuera de litio mediante la perforación de pozos Rotary. Estos descubrimientos orientarán la planificación de futuras perforaciones. Los estudios geológicos y el método CSAMT fueron fundamentales para esta determinación, junto con la selección estratégica de ubicaciones para la perforación de 35 pozos Rotary. Los análisis permitieron establecer la superioridad de las rocas del basamento en susceptibilidad magnética, proporcionando una base para futuras inversiones en zonas sin datos de pozos.

La quimioestratigrafía proporcionó información detallada sobre procesos sedimentarios en la cuenca, identificando horizontes estratigráficos y relaciones geoquímicas significativas. Asimismo, se determinó la distribución de sedimentación fina y acuíferos de salmuera mediante el método CSAMT, permitiendo la ubicación precisa de pozos estratégicos con altos caudales y concentraciones de litio. Estos análisis son esenciales para optimizar la ubicación de perforaciones y maximizar la extracción de litio.

Palabras Clave: Cuenca, Basamento, Litio, Acuífero.

Evolución Estratigráfica del Mioceno al Reciente del Núcleo del Salar de Atacama

Iván Gómez Schulz¹, Sebastián Bascuñán¹, Juan Becerra Miranda¹, César Arturo Arriagada Ortega²

(1) SQM Salar S.A., El Trovador 4285, Las Condes, Santiago, Chile

(2) Consultor Independiente, Santiago, Chile

Introducción

El contexto de la crisis climática ha empujado a la industria, y a la sociedad en general, a buscar maneras de transformar la matriz energética hacia fuentes más limpias, renovables y sustentables. Las baterías de litio se han convertido en una importante herramienta en la persecución de estos objetivos. En nuestro país, las salmueras alojadas en las cuencas de los salares, en especial el Salar de Atacama, representan una de las más importantes fuentes de este elemento a nivel mundial. Los procesos que explican el enriquecimiento de estas salmueras son aún esquivos, así como la fuente del litio en sí, y se torna de especial importancia entender la evolución de las cuencas que alojan estos recursos.

Síntesis evolución Salar de Atacama

El Salar de Atacama es la anomalía topográfica negativa más importante de los Andes Centrales. Mientras hacia el oeste de la Cordillera de la Sal se encuentra una delgada subcuenca aluvial, el Llano de la Paciencia; hacia el este, la enorme depresión del Salar de Atacama, extremadamente plana y aparentemente sin actividad tectónica, oculta en subsuperficie una compleja estructura interna que incluye sistemas de fallas y pliegues que deforman unidades de edad Paleozoico y series estratificadas del Mesozoico al Cenozoico.

Esta historia de deformación esencialmente compresiva, que incluye tectónica salina bajo condiciones áridas, ha permitido el desarrollo de varias subcuencas continentales con importantes variaciones de espesor y distribución litológica heterogénea en la estratigrafía del Mioceno al Reciente.

Entre los c.a. 12 y 3 Ma el Salar de Atacama fue afectado por varias fases eruptivas de intenso volcanismo explosivo de carácter regional asociadas con la formación del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna. El detallado registro de facies sedimentarias además de edades radiogénicas en depósitos volcano – sedimentarios intercalados, obtenidos en la subsuperficie del núcleo del Salar, permiten presentar un marco litoestratigráfico y cronoestratigráfico, aunque con variaciones laterales de facies, consistente con las cuencas de Calama y Quillagua.

En este contexto, entre los 12 a 9 Ma habría predominado un ambiente continental de llanura aluvial distal a playa con sectores evaporíticos, mientras que desde los 9 Ma se intensifican las condiciones de aridez e hiper-aridez periódicamente interrumpidas por eventos volcánicos explosivos. Las variaciones en el espesor, discordancias internas y deformación local de las secuencias sedimentarias indican que la tectónica ha sido activa con pulsos variables en los últimos 12 Ma y ha configurado la estructura interna de esta cuenca salina. El Sistema de Falla del Salar que divide el núcleo en un bloque occidental alzado y uno oriental caído produjo un desfase vertical de alrededor de 900 m, donde ~700 m habrían ocurrido durante el Plioceno y ~200 m durante el Cuaternario.

Palabras Clave: Salar de Atacama, Estratigrafía, Litio.

Esquema Estratigráfico y Modelo Geológico 3D del Núcleo del Salar de Atacama

Constanza Novoa Gallegos¹, Yerko Simicic Hernández¹, Sebastián Bascuñán¹, Juan Becerra Miranda¹

(1) SQM Salar S.A., El Trovador 4285, Las Condes, Santiago, Chile

Un adecuado entendimiento de la compleja variabilidad temporal y heterogeneidad geológica del reservorio del núcleo del Salar de Atacama requiere el desarrollo y permanente actualización de modelos geológicos e hidrogeológicos. SQM utiliza estos modelos para la toma de decisiones a distintos niveles (exploración, operación, producción) con el fin de reducir los errores y la incertidumbre en la cadena de valor geológica. Diversos estudios, descripciones, mediciones directas e indirectas han permitido alimentar y robustecer un modelo conceptual y la posterior construcción del Modelo Geológico que presentamos a continuación.

El Salar de Atacama corresponde a una cuenca tectónica, de carácter esencialmente compresivo en sus fases recientes, y está afectado por fallas en general de alto ángulo, que afectan desde el basamento paleozoico hasta la cobertura actual sin mayor expresión en superficie. El espacio generado en los movimientos de estas fallas ha controlado desde el Mesozoico la deposición de las distintas formaciones reconocidas en el área, así como la morfología actual. En este sentido, el Sistema de Falla Salar es el rasgo estructural más importante del centro del Salar, dividiendo en dos bloques principales (Bloque Oeste y Bloque Este) la estratigrafía del núcleo.

Esencialmente 4 unidades mayores dominan la estratigrafía del núcleo del Salar y constituyen el Modelo Geológico. De base a techo se encuentra la Unidad Basal (UG1) constituida de arcillas, limos y areniscas rojas. Su techo se profundiza hacia el sector norte del bloque oeste, mientras que es más somero en las proximidades de la Cordillera de la Sal, aflorando en superficie. Directamente sobre la unidad de Arcillas, se encuentra la unidad Halitas Profundas (UG2) que corresponden a halita pura, halita con sedimentos y/o yesos, halitas con arcillas y/o con arenas. Sobreyace en discordancia a la Unidad Basal y es cubierta por la Unidad Evaporítica y Volcanoclástica Intermedia (UG3). Esta unidad se encuentra conformada por una intercalación de yesos, tobas y niveles volcanoclásticos re trabajados, afectados por acuífamientos y truncamientos locales. Hacia el norte del Salar se presenta un cambio de facies donde los yesos gradan a halitas, cuya potencia aumenta hacia el norte, y se acúñan hacia el sur. Las UG1, 2 y 3, en los bordes de la cuenca, se encuentran a profundidades someras, y en las cercanías de las zonas de los dominios estructurales asociados con las fallas Cabeza de Caballo y Salar se encuentran deformadas en geometría de flexuras. Finalmente, se encuentra la unidad de Cloruros Superiores (UG4) constituida por halita pura y halita con sedimentos y/o yesos. En su parte alta (superficie del Salar de Atacama) está constituida por depósitos evaporíticos recientes (halita, sulfatos y detritos) mientras que los sedimentos clásticos superficiales (facies aluviales) se encuentran principalmente a lo largo de los márgenes del salar.

Palabras Clave: Salar de Atacama, Modelación, Geología Estructural, Estratigrafía.

Métodos Geofísicos aplicados al Reconocimiento de la Interfaz Salina, Salar de Atacama

Francisca Quiroz Valencia¹, Sebastián Bascuñán¹, Ramón Queizal Zurita¹, Juan Becerra Miranda¹

(1) SQM Salar S.A., El Trovador 4285, Las Condes, Santiago, Chile

Introducción

El Salar de Atacama consiste en uno de los más grandes reservorios de Litio y Potasio en salmuera a nivel mundial, y la caracterización de sus propiedades físicas es relevante para entender tanto la geometría del reservorio como las propiedades hidráulicas de las capas que la componen. Adicionalmente, SQM realiza una caracterización y monitoreo continuo en la Zona Marginal, del Salar de Atacama, donde se deben configurar y aplicar técnicas que permitan entender la dinámica y funcionamiento de sistemas y sus respectivas variables hidrogeológicas y geológicas, entre otros.

Monitoreo de la Interfaz Salina

SQM emplea la técnica geofísica del Transiente Electromagnético (TEM) como parte de su programa de monitoreo ambiental en las áreas de interés en el borde este del Salar de Atacama (Zona Marginal). Esta técnica se utiliza de manera periódica, realizándose mediciones semestrales, con el propósito de monitorear la posición, forma y pendiente de la interfaz salina en la Zona Marginal, complementando así las mediciones de perfil de conductividad eléctrica que se realizan semestralmente en los pozos cercanos.

Los trabajos realizados en junio y diciembre de 2022 han permitido definir la posición, forma y pendiente de la interfaz salina, mediante la evaluación de las características geoelectricas del subsuelo. A partir de las secciones de resistividad obtenidas de las mediciones TEM, se han identificado 5 unidades geoelectricas definidas por sus contrastes de resistividad, las cuales responden a características geológicas e hidrogeológicas del substrato.

La interfaz salina detectada mediante el método TEM muestra un patrón similar en las estaciones occidentales, cercanas al núcleo del Salar, presentándose de forma horizontal. Sin embargo, hacia el este de los perfiles, en las cercanías de la zona Marginal, se observa un aumento gradual en la profundidad de la interfaz. En general, al comparar las pendientes de la interfaz salina obtenidas en las campañas del primer y segundo semestre de 2022, se puede observar que se conservan, teniendo en cuenta el margen de error.

Los pozos que miden conductividad eléctrica ubicados entre las estaciones TEM muestran la presencia de salmuera a profundidades concordantes con las posiciones donde se detecta la interfaz salina en las estaciones TEM. Esto respalda la forma de la interfaz descrita por las secciones de resistividad.

Los estudios de Transiente Electromagnético realizados por SQM son consistentes con estudios históricos realizados por terceros que detectan la interfaz salina en la Zona Marginal, del Salar de Atacama. No obstante, SQM se encuentra en una constante búsqueda y aplicación de técnicas que permitan mejorar la calidad de las mediciones TEM con el objetivo de garantizar una caracterización y monitoreo confiable y preciso.

Palabras Clave: TEM, Interfaz Salina, Resistividad.

Exploración electromagnética aplicada a la caracterización de salmueras de Litio en Salares Andinos: una aproximación desde el Salar de Tara (Chile)

Felipe Reyes Córdova¹, Daniela Montecinos-Cuadros¹, Pablo Alarcón Pinto¹, Cristián Roncagliolo¹, Sebastián Arra Lusetti², Julietta Zamora²

(1) Geo Resource Ltda, Chillán, Chile

(2) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

En el escenario actual, donde la agenda mundial ha centrado su atención en el cambio climático y en la migración a tecnologías que permitan una transición del mercado energético hacia fuentes renovables, el interés en la exploración y explotación de los depósitos de litio ha aumentado fuertemente. En este contexto, de acuerdo al *Mineral Commodity Summaries* del año 2022, efectuado por el *US Geological Survey*, Latinoamérica concentra el 60% de todas las reservas de litio identificadas hasta la fecha, de las cuales, cerca de un 94% se encuentran en Bolivia, Argentina y Chile, en lo que ha sido llamado el Triángulo del Litio.

A diferencia de los depósitos como los ubicados en Australia, donde el Litio se encuentra principalmente asociado con la ocurrencia de pegmatitas, en el Triángulo del Litio es posible hallarlo en salmueras propias de los distintos salares y lagunas salinas de la región. Es el hecho anterior el que permite que métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos, como la magnetotelúrica (MT) y el transiente electromagnético (TEM), sean de interés para su exploración económica, al ser capaces de determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, pudiendo así caracterizar la geometría de las unidades hidrogeológicas, que permitan conocer y entender los ciclos que ahí se producen.

En términos generales, la resistividad eléctrica de rocas y sedimentos puede variar entre 5 y $10^5 \Omega\text{m}$ (e.g. Palacky, 1987), mientras que la resistividad eléctrica de salmueras suele tener valores $< 1 \Omega\text{m}$. Por ejemplo, Risacher *et al.* (1999) reporta resistividades de hasta $0,05 \Omega\text{m}$ en salmueras de salares de la región de Antofagasta. Al infiltrarse estos fluidos en los sedimentos y rocas circundantes, la resistividad eléctrica del medio se verá fuertemente disminuida. De este modo, si consideramos un sedimento que posea una resistividad de $400 \Omega\text{m}$ con una porosidad efectiva del 10% que almacena una salmuera de $0,05 \Omega\text{m}$, a partir del uso de leyes de mezcla (e.g. *Modified Archie's Law* - Glover *et al.*, 2000) se obtiene que la resistividad total del medio bajaría aproximadamente a $1 \Omega\text{m}$. Esto permite que medios afectados por fluidos de alta salinidad sean fácilmente identificados a través de métodos geofísicos que sean capaces de recuperar modelos de resistividad eléctrica.

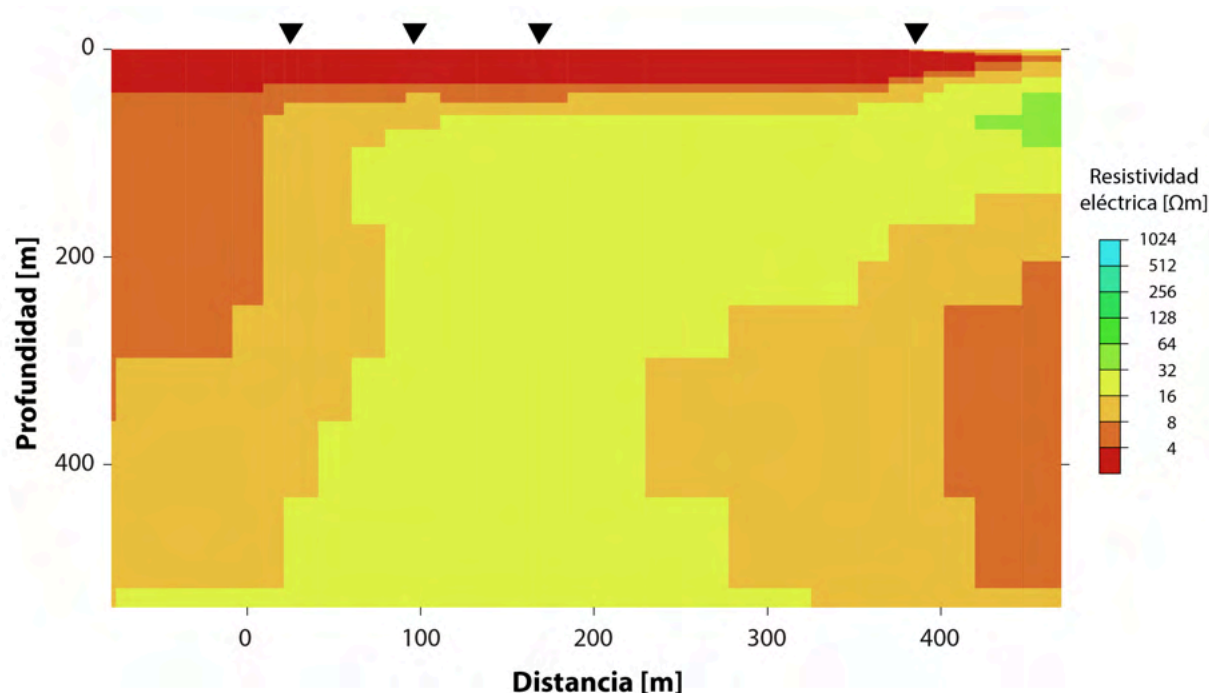
El TEM ha sido de momento la principal herramienta a la hora de realizar exploración en depósitos salinos, y si bien su adquisición y procesamiento son relativamente simples, plantea algunos desafíos técnicos a la hora de caracterizar la estructura profunda de los acuíferos salinos. Al ser un método electromagnético, su profundidad de investigación se encuentra afectada directamente por la resistividad eléctrica del medio. Si consideramos dos arreglos de TEM con la misma geometría y nivel de ruido, aquel que se ubique sobre un medio más conductivo no será capaz de sondear mayores profundidades, debido a la rápida disipación de las cargas en el subsuelo. Para sobrellevar este problema, es posible aumentar el tamaño del *loop* y la intensidad de corriente que se hace circular por este. Por otro lado, el método MT que sufre del mismo problema de profundidad de penetración que el TEM, puede sobrellevar esta dificultad realizando mediciones más largas con menores frecuencias de muestreo.

Pero lo anterior no es lo único que hay que considerar a la hora de diseñar una campaña. El MT al ser un método pasivo que usa las variaciones naturales de los campos electromagnéticos terrestres será mucho más sensible al ruido cultural electromagnético que el TEM, aunque ninguno de los dos métodos es infalible a este, teniendo siempre que tener en cuenta la proximidad a posibles fuentes de ruido, como caminos, tendidos eléctricos, gasoductos o motores, puesto que esto puede llegar a causar la inviabilidad de la medición. El desarrollo de costras salinas pronunciadas es otro factor que puede favorecer el uso de TEM, ya que al ser un método inductivo no requiere de un buen contacto eléctrico para poder ser llevado a cabo, como si el caso del MT para efectuar las mediciones de campo eléctrico.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, en este trabajo se presentan modelos de resistividad eléctrica del Salar de Tara, laguna salina de tipo playa ubicada en la región de Antofagasta, los cuales se desarrollaron a partir de datos adquiridos durante febrero del 2023, a través de la medición conjunta de datos de TEM y audiomagnetotelúrica (AMT). El registro de las estaciones de TEM fue pensado con el objetivo de determinar la estructura somera de la laguna salina, mientras que este fue complementado con las estaciones de AMT, las cuales buscaban identificar la distribución espacial de las salmueras profundas.

Desde una perspectiva tectonoestratigráfica, el salar se asienta sobre ignimbritas neógenas propias del magmatismo explosivo del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna (de Silva, 1989), que sobreyace unidades sedimentarias paleógenas a cretácicas conformadas por conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas. Finalmente, bajo estas secuencias se encontraría una unidad ordovícica compuesta por lutitas y areniscas cuarcíferas. Debido a la potente cubierta ignimbítica no se conoce con certeza la geometría de los sistemas estructurales que afectan a la zona, pero si se reporta en la Hoja Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985) la existencia de una falla normal en la Pampa de Tara que podría representar el límite occidental de la cuenca del Salar de Tara, y que al ser prolongada hacia el sur coincide aproximadamente con el escarpe oriental de la Caldera La Pacana.

Por otro lado, el comportamiento hidrogeológico en los salares se encuentra dominado por el contraste de densidad entre las salmueras y los fluidos de recarga meteórica. La evaporación continua en la superficie del salar aumenta la densidad de los fluidos salinos, lo que produce un descenso de estos por acción gravitatoria. Esta dinámica permite el ascenso de fluidos menos salinos, causando el desarrollo de una zona de mezcla en los márgenes del salar (Marazuela *et al.*, 2019). Por otro lado, se ha propuesto que el desarrollo de la cubierta ignimbítica asociada con el Complejo Volcánico del Altiplano-Puna actúa como fuente para el enriquecimiento de Li en el Salar de Atacama, donde procesos de lixiviación en la interacción agua-roca permite la movilización



Modelo de resistividad eléctrica 2D obtenido mediante audiomagnetotelúrica.

preferente de este elemento hacia las aguas (Álvarez-Amado *et al.*, 2022). En el caso del Salar de Tara, Arra y Zamora (2023) reportan concentraciones promedio de 798,8 ppm de Li.

Para una caracterización inicial en la fase de exploración, fueron desplegadas seis estaciones de AMT y doce estaciones de TEM, focalizadas en dos áreas en los márgenes de la laguna salina. Las estaciones de AMT, adquiridas usando el equipo ADU-08 de Metronix, fueron procesadas utilizando una implementación del algoritmo robusto de Egbert y Booker (1986), y fueron capaces de recuperar periodos entre 10^{-4} y 10^{-1} [s] con muy buena calidad de datos. Además del tensor de impedancia, se calcularon los vectores de inducción de todas las estaciones, los que fueron incorporados en el análisis dimensional efectuado. Las estaciones de TEM, adquiridas usando el equipo WalkTEM 2 de ABEM, fueron desplegadas utilizando antenas transmisoras de 40 x 40 m. El sistema de medición incluye dos modos de medición, el *low moment* (LM) que registra los tiempos temprano, que representa información más somera y el *high moment* (HM) que obtiene información más profunda a partir de los tiempos tardíos. Para el registro del LM se utilizó una intensidad de corriente de ~1 A y una frecuencia de repetición de aproximadamente 222 Hz. Por otro lado, el HM utilizó un esquema de ~6 A y 25 Hz. El modelamiento de las estaciones de TEM se realizó utilizando esquemas de inversión 1D.

Para realizar el análisis de dimensionalidad de las estaciones de AMT, se calculó el rumbo eléctrico (Zhang *et al.*, 1987) y el tensor de fase (Caldwell *et al.*, 2004). Para todas las estaciones se obtuvo un valor de $\beta < \pm 3^\circ$, lo que podría ser índice de una situación bidimensional, razón por la cual las estaciones fueron modeladas utilizando el algoritmo de inversión 2D de Rodie y Mackie (2001). Las estaciones del sector norte mostraron la existencia de un rumbo claro de 45° , mientras que las estaciones del sur poseen un rumbo de 15° , razón por la cual todas las estaciones fueron rotadas. Para la obtención del parámetro de regularización se construyó la curva L, a partir de la cual se desprende un valor de $\tau=10$ para ambos modelos. Además, se usaron pisos de error de 10% para la resistividad aparente y 5% para la fase. Los modelos obtenidos presentan un muy buen ajuste, con RMS aproximadamente 1. Análisis de sensibilidad no lineales fueron efectuados tanto para los modelos de TEM, como de AMT para verificar la robustez de los resultados. Este análisis sugiere que los modelos de MT podrían tener sensibilidad entre 300 y 1.800 m, dependiendo de la estación considerada.

Las estaciones de TEM TST1 a TST11 presentan una estructura de resistividad similar, caracterizada por una capa inicial muy delgada, de entre 30 y 50 centímetros que presenta resistividades de entre 20 y 25 Ωm . Esta se dispone sobre una capa muy conductora cuya potencia varía entre 16 y 18 metros, y presenta valores de resistividad en torno a los 0,2 Ωm . Esta capa es detectada con un menor espesor por las estaciones ubicadas en la zona norte, alcanzando 6 metros de potencia. Esta última unidad conductiva descansa sobre una capa más resistiva, pero cuyo valor de resistividad no pudo ser resuelto por las mediciones. Por otro lado, la estación TST12 instalada fuera de la laguna salina demuestra una estructura de resistividad distinta respecto al resto de mediciones, sugiriendo la presencia de una capa de 18 metros con valores de resistividad de ~25 Ωm que yace sobre una capa de ~90 metros con una resistividad de ~50 Ωm . A los 110 m b.n.t. se registra una disminución en la resistividad eléctrica, alcanzando 4 Ωm .

Al igual que con el TEM, los modelos obtenidos a partir de las estaciones de AMT resuelven una capa superficial de baja resistividad ($<1 \Omega\text{m}$) que posee un mayor espesor hacia el sur, y que varía entre 10 y 20 metros. Hacia el oeste, bajo el espejo de agua, esta estructura se profundiza con valores de 5 – 15 Ωm , hasta al menos los 300 m, cerca del límite de resolución en esta zona. En la zona oriental se resuelve una anomalía conductiva de entre 5 – 10 Ωm , entre los 200 y 600 metros.

A partir de los 800 m la resistividad eléctrica aumenta continuamente hasta alcanzar el límite máximo de resolución en torno a los 1.800 m b.n.t. alcanzando valores de $\sim 70 \Omega\text{m}$. De esta forma, los modelos de resistividad eléctrica lograron caracterizar la geometría de posibles salmueras en profundidad, además de reconocer una zona que podría corresponder a la interfaz entre los fluidos salinos y las aguas superficiales de posible recarga meteórica en el salar. La aplicación de métodos electromagnéticos, demostró ser una potente herramienta para caracterizar salmueras con Litio en profundidad.

Además, desde el punto de vista de los métodos de exploración, se confirma la eficacia de combinar MT y TEM para identificar y caracterizar salmueras en profundidad en medios altamente conductivos. Por último, a partir de lo obtenido, se recomienda siempre tener una caracterización fuera de la extensión superficial del salar, para de esta forma, lograr una comprensión acabada de los sistemas hidrogeológicos, que contribuyan incluso a tomar decisiones respecto a la posible reinyección de salmueras, en el caso de aplicar métodos de extracción directa.

Palabras Clave: Litio, Salares, Exploración geofísica, Transiente electromagnético (TEM), Magnetotelúrica (MT).

Referencias:

- Álvarez-Amado, F., Rosales, M., Godfrey, L., Poblete-González, C., Morgado, E., Espinoza, M., ... & Cortés-Aranda, J. (2022). The role of ignimbrites and fine sediments in the lithium distribution and isotopic fractionation in hyperarid environments: Insights from Li-isotopes in the Atacama Desert. *Journal of Geochemical Exploration*, 241.
- Arra Lusetti, S., & Zamora, J. (2023). Evaluación del potencial económico bajo una mirada sustentable del Salar de Tara, San Pedro de Atacama, provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile. XVI Congreso Geológico Chileno.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C. (2004). The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2).
- De Silva, S. L. (1989). Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*, 17(12).
- Egbert, G. D., & Booker, J. R. (1986). Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal International*, 87(1).
- Gardeweg, M., & Ramírez, C. F. (1985). Hoja Río Zapaleri. II Región de Antofagasta. Escala 1: 250.000.
- Glover, P. W., Hole, M. J., & Pous, J. (2000). A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters*, 180(3-4).
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019). Hydrodynamics of salt flat basins: the Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment*, 651.
- Palacky, G. J. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar Méndez, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones-Chile.
- Rodi, W., & Mackie, R. L. (2001). Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1).
- US Geological Survey. (2022). Mineral Commodity Summaries, 2022. Government Printing Office.
- Zhang, P., Roberts, R. G., & Pedersen, L. B. (1987). Magnetotelluric strike rules. *Geophysics*, 52(3).

Estimación de Recursos de Salmuera In Situ del Núcleo, Salar de Atacama

Yerko Simicic Hernández¹, Matías Mocanu Díaz¹, Sebastián Bascuñán¹, Juan Becerra Miranda¹

(1) SQM Salar S.A., El Trovador 4285, Las Condes, Santiago, Chile

Introducción

El Salar de Atacama consiste en uno de los más grandes reservorios de Litio y Potasio en salmuera a nivel mundial. En base a su compromiso con las autoridades nacionales e internacionales, SQM estima sus Recursos Minerales In Situ en base al Código Minero de Chile (CH 20235) y la normativa S-K1300 (S. E. C.: Securities and Exchange Commission) de Estados Unidos, los que son públicamente reportados de manera anual (CORFO, S.E.C., entre otros).

El modelo de Recursos In Situ busca reducir la incertidumbre en el depósito y reportar volúmenes y leyes de salmuera que se ajusten a los datos en cada uno de los 6 dominios de estimación. Esto cobra especial relevancia en un yacimiento de Salmuera (dinámico) donde el desafío consiste en reflejar las propiedades actuales de interés (porosidad, química) al igual que su distribución en 81.920 ha (OMA Extracción), como es el caso del Salar de Atacama. El Recurso Mineral In Situ se estimó en el núcleo del Salar de Atacama en base a la litología, porosidad efectiva y concentración química de los distintos resultados obtenidos en las campañas de exploración históricas y recientes, tanto en mediciones frecuentes como de monitoreos y mediciones directas e indirectas geofísicas.

Aquí se presenta cómo fue estimado el Recurso Mineral In Situ en un modelo de ~ 19.000.000 de bloques, a través de un flujograma estándar y sus mejoras respectivas, destacando las siguientes etapas:

- Construcción del Modelo Geológico: se utilizó información litológica, así como geofísica de pozos disponibles, para generar volúmenes de unidades geológicas en tres dimensiones. Corresponden a ~2.700 pozos con estratigrafía y/o geofísica, los que se traducen en el establecimiento de más de 20 unidades geológicas.
- Cálculo del Volumen de Salmuera: La porosidad efectiva se estimó mediante kriging ordinario (KO). Además, se utilizó la piezometría en el cálculo de salmuera considerando el nivel saturado del Salar. Se utilizaron ~ 9.500 muestras de porosidad por picnometría, obtenidos de ~ 85 pozos de diamantina.
- Interpolación de concentraciones y densidad de salmuera: Las concentraciones de los iones de interés (Li y K) y la densidad fueron estimadas utilizando KO, a partir de ~4.900 muestras seleccionadas de ~1.400 sondajes.

A partir de esto, se calculó la masa de cada elemento químico como el producto de la porosidad efectiva, la densidad y las concentraciones estimadas en cada bloque. Así, se estimó un total de 3.689 millones de metros cúbicos de volumen de salmuera, lo que corresponde a 8.2 y 79.8 millones de toneladas para litio y potasio metálicos (Recursos Exclusivos de Reservas), respectivamente. Estos valores corresponden a la suma de los recursos medidos e indicados.

El Recurso Mineral se clasificó en tres categorías que incluyen Medido, Indicado e Inferido, según los estándares de calidad internacionales y de SQM para proyectos de salmuera, que incluyen el nivel de caracterización y conocimiento de las unidades hidrogeológicas y los criterios geoestadísticos de rigor. El nivel de caracterización hidrogeológica se priorizó como la primera clasificación basada en la exploración, el monitoreo y los datos de producción históricos.

Palabras Clave: Estimación, litio, potasio, Salar de Atacama.

Análisis de los efectos del litio en aguas termales de Pojpoquella sobre calidad de vida y bienestar emocional de las personas en Ayaviri-Melgar-Puno

Erick Romario Tapia Huacoto¹⁻²

(1) Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Ingeniería Geológica, AV. Floral, 1153, Puno, Perú
(2) Universidad Central de Chile, Santiago, Geología, Nataniel Cox, 620., Santiago, Chile

Esta investigación se enfoca en analizar los efectos del litio presente en aguas termales de Pojpoquella en la calidad de vida y el bienestar emocional de las personas en el distrito de Ayaviri-Melgar-Puno en 2023. El litio es un elemento de importancia global debido a su aplicación en avances tecnológicos y su uso histórico en la medicina para tratar trastornos emocionales. El estudio se basa en un enfoque piloto prospectivo para evaluar la viabilidad y recopilar datos preliminares antes de un análisis exhaustivo. Se utilizarán técnicas de codificación para organizar los datos en categorías significativas y se consolidará la triangulación de fuentes, método o perspectivas para asegurar la validez y confiabilidad de los resultados. El objetivo principal es establecer una posible relación entre la presencia de litio en aguas termales y la vida emocional de los habitantes de Ayaviri. Se espera que los hallazgos arrojen datos significativos sobre los impactos del litio en la calidad de vida y el bienestar emocional de las personas, contribuyendo así al conocimiento científico de la importancia del uso del litio.

Identificación del problema:

Analizar los impactos del litio presente en las aguas termales y su influencia en la calidad de vida y el bienestar emocional de los habitantes de la provincia de Ayaviri-Melgar-Puno en el año 2023.

Valoración del problema:

Es relevante para los habitantes de la provincia de Ayaviri-Melgar-Puno, ya que el uso de las aguas termales es un recurso valioso para la población local en términos de salud. Comprender los impactos del litio en estas aguas termales es esencial para garantizar la preservación de la calidad de vida y el bienestar emocional de la comunidad.

Formulación del problema:

¿Cuál es el efecto de la concentración de litio en las aguas termales sobre la calidad de vida y el bienestar emocional de los residentes de Ayaviri-Melgar-Puno en el año 2023?

Hipótesis del trabajo

El litio presente en las aguas termales está asociado a una mejora en el bienestar emocional y la calidad de vida de las personas que se sumergen en ella.

Objetivo general

Establecer la relación entre la vida emocional de las personas y la presencia de litio en las aguas termales en el distrito de Ayaviri en la región de Puno, 2023.

Objetivos específicos

- 1) Investigar las características hidrogeológicas de las aguas subterráneas que se encuentran bajo el balneario Pojpoquella, ubicado en el Distrito de Ayaviri.
- 2) Determinar las características físico-químicas de las aguas termales del balneario Pojpoquella, ubicado en el Distrito de Ayaviri.

Metodología de investigación

La metodología utilizada en el siguiente proyecto de investigación será de modelo piloto prospectivo, abierto. Esto significa que el estudio se llevará a cabo durante un período de tiempo de 8 semanas y que los participantes se asignarán aleatoriamente a dos grupos. Todos recibirán la misma intervención, que serán baños termales ricos en litio.

El estudio se realizará en el Balneario de Pojpoquella, Ayaviri, incluirá a 10 participantes, los que se sumergirán 30 minutos 4 días a la semana.

Los participantes serán todos adultos en un rango de edades 45 – 65 años los cuales serán evaluados al inicio del estudio, después de 4 semanas de tratamiento y después de 8 semanas de tratamiento para poder confirmar el objetivo principal “establecer la relación entre la vida emocional de las personas y la presencia de aguas termales en el distrito de Ayaviri”.

Las evaluaciones incluirán medidas de estado de ánimo, bienestar y calidad de vida, constará de:

- Inventario de Depresión de Beck (BDI)
- Evaluación Cognitiva de Montreal (MoCA).

Impactos esperados

1. Impactos en Ciencia y Tecnología: Comprensión científica
2. Impactos económicos: Valorización de los recursos naturales, Investigación y desarrollo de tecnologías
3. Impactos sociales: Promoción de la inclusión y el acceso igualitario

Palabras Clave: Aguas termales, farmacología moderna, trastornos del humor.

Financiamiento: Muestras de metales pesados en aguas :cantidad: 05 / costo por unidad (\$ 70), total: \$ 350. Muestras toxicológicas en sangre :cantidad: 15 / costo por unidad (\$ 90), total: \$ 1.350. Papelería :Cantidad: 15 / costo por unidad (\$ 2), total: \$ 30.

Agradecimientos: Es un honor tener la posibilidad de compartir mi investigación, agradeciendo profundamente a mi alma mater la Universidad Nacional del Altiplano. ¡Muchas gracias!

Referencias:

- Balon, R. (2018). Lithium in Drinking Water and Suicide Rates across the East of England. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 45, 162-166.
- Bettmann, J. E., & Wolff, A. V. (2017). Possible Behavioral Effects of Lithium in Therapeutic Doses. *Pharmacological Reviews*, 69(3), 373-387.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., & Carlier, G. (2009). Puesta en evidencia de acreciones Mezoproterozoicas en la formación de la litósfera del Sur del Perú. UNSAAC. Lima: INGEMET.
- Cerrón, F., & Chacaltana, C. (2003). Actualización del cuadrángulo de Ayaviri (30-u). Lima: INGEMET.
- Grunze, H., Vieta, E., Goodwin, G. M., Bowden, C., Licht, R. W., Möller, H. J., & Kasper, S. (2013). The World Federation of Societies of Biological Psychiatry (WFSBP) Guidelines for the Biological Treatment of Bipolar Disorders: Update 2012 on the Long-Term Treatment of Bipolar Disorder. *The World Journal of Biological Psychiatry*, 14(3), 154-219.
- Huamaní, A. (2001). Aguas termales y minerales en el suroriente del Perú. Lima: INGEMET.
- Murru, A., & Pacchiarotti, I. (2017). Lithium in Drinking Water and Suicide Prevention: A Review of the Evidence. *Current Environmental Health Reports*, 4(4), 462-469.
- Rabasseda, X. (2018). Depression: Adding Lithium to the Treatment Equation. *Nature Reviews. Drug Discovery*, 17(3), 162.
- Schrauzer, G. N., & Shrestha, K. P. (1990). Lithium in Drinking Water and the Incidences of Crimes, Suicides, and Arrests Related to Drug Addictions. *Biological Trace Element Research*, 25(2), 105-113.
- Vargas, V. (2010). Las fuentes termales en el Perú estado y uso actual. *Sociedad Geológica del Perú* (9), 1175-1178.

¿Puede Chile extraer litio de las salmueras geotermales? Enfoque estadístico para determinar los factores geoquímicos en el enriquecimiento de litio

Álvaro Navarrete Calvo²⁻³, Estefanía Muñoz Wolf¹, Diego Aravena Noemi⁴, Estefanía Camus Contreras⁵, Felipe Ruiz Arriagada¹, Belén Muñoz Lavín¹, **Alejandra Acuña Hernández¹**

- (1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Ejército 146, Santiago
 (2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Av. Manuel Montt 367, Santiago, Chile.
 (3) Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Sazié 2119, Santiago, Chile.
 (4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Pl. Ercilla 803, Santiago
 (5) Universidad del Alba, Departamento de Geología, Avda. Cuatro Esquinas 060, La Serena, Chile.

En la actualidad, se conocen proyectos geotermales en Estados Unidos en los que, además de la extracción de energía, se extraen de los fluidos geotermales elementos de interés económico como el litio. Entre estos proyectos, el Salton Sea, ubicado en el Valle Imperial de California, destaca como la principal fuente de salmueras geotermales ricas en litio en el país, con concentraciones que van entre los 90-440 ppm, lo que lo convierte en el proyecto con el mayor potencial de salmuera geotermal de litio en Estados Unidos (Dobson, 2021).

Estudios previos (Nicolau, 2014; Tassi, 2010; Cortecci, 2005; Risacher, 2010; Muñoz Saez, 2018) han revelado que el campo geotermal El Tatio, situado en la región norte de Chile, en Antofagasta, alberga concentraciones de litio que alcanzan hasta 61 ppm en las muestras de aguas superficiales. Por ello, surge la pregunta de si es factible desarrollar este tipo de proyectos híbridos en Chile para hacer más rentable la exploración-explotación de este recurso.

La extracción de elementos valiosos de las salmueras geotermales se ha desarrollado utilizando diferentes metodologías. El método mejor investigado y probado para la extracción directa de Li de las salmueras se basa en la adsorción por óxidos e hidróxidos metálicos, ya que cumple con los criterios de eficiencia y rentabilidad económica. Investigaciones previas indican que las características químicas de los fluidos de los campos geotermales en Estados Unidos son similares a las de los sistemas hidrotermales chilenos, por lo que el desarrollo de actividades de explotación en el país sería factible mediante una adecuada transferencia de tecnología.

En este estudio se realiza un análisis estadístico de los datos geoquímicos de los fluidos de los sistemas geotermales de alta entalpía en el norte y centro del país. El estudio se centra en las concentraciones de Li, con el fin de investigar las condiciones geoquímicas que favorecen altos niveles de Li.

Los resultados sugieren que la correlación entre la temperatura del fluido y el Li no es significativa, mientras que muestran una fuerte correlación positiva con las concentraciones de Boro (B), Cloro (Cl) y Sodio (Na), posiblemente debido a procesos secundarios como lixiviación y/o mezclas de aguas.

De acuerdo con Lagos (2016), se ha evidenciado que algunas salmueras tienen la capacidad de disolver depósitos evaporíticos, y además, se ha observado que las salmueras y las aguas termales se mezclan en subsuperficie. Por lo que el grado de participación de las salmueras en aguas termales puede ser un elemento clave para el enriquecimiento de Li.

Por lo tanto, la correlación positiva entre las concentraciones de boro, cloro y sodio con el litio puede ser resultado de la interacción entre la lixiviación de minerales, la mezcla de aguas subterráneas y la influencia de los depósitos evaporíticos, particularmente en un entorno de salinización de suelos. Por lo que la participación de las salmueras en las aguas termales puede desempeñar un papel crucial en el enriquecimiento de litio en esta región. (Acuña, 2023 y referencias allí citadas).

El desarrollo de actividades de explotación híbridas en los sistemas geotermales chilenos parece prometedor, aunque todavía faltan criterios específicos para una evaluación correcta del potencial de recursos de Li en las salmueras. Eventualmente, se recomiendan estudios adicionales que tengan como objetivo proporcionar una evaluación adecuada de la eficiencia de diferentes métodos de extracción de Li.

Palabras Clave: Litio, Geotermia, Desarrollo sostenible, Recursos geotérmicos, Energías renovables.

Financiamiento: privado.

Agradecimientos: Agradezco a todos los que contribuyeron al éxito de este proyecto de investigación. Gracias por su valiosa orientación, apoyo y comentarios.

Referencias:

- Stringfellow, W.T.; Dobson, P.F. (2021). Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies* 2021, 14, 6805. <https://doi.org/10.3390/en14206805>.
- Nicolau, R., Chong, G., Morata, D., & Morata, C. (2014). Physico-chemical and environmental controls on siliceous sinter formation at the high-altitude El Tatio geothermal field, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 282.
- Lagos, L. (2016). Hidrogeoquímica de las fuentes termales en ambientes salinos relacionados con salares en los Andes del Norte de Chile. Universidad de Chile.
- Acuña, A. (2023). Análisis estadístico del enriquecimiento de litio en sistemas geotermales de alta entalpía en el norte y centro de Chile. Memoria para optar al título de geóloga.

Evaluación de los recursos geotérmicos para la implementación de sistemas de calefacción cerrado vertical con bombas de calor geotérmicas en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos

Nelson Albarran¹, Carlos Carrasco¹, Yasna Pérez¹, Elizabeth Soto²

(1) Unidad de Recursos Geotérmicos, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)

(2) Unidad Geotermia y Energía Distrital, División Energías Sostenibles del Ministerio de Energía

En el marco del desarrollo de la energía geotérmica, SERNAGEOMIN en conjunto con el Ministerio de Energía han elaborado evaluaciones de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía para estimar el potencial disponible e incentivar el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de este recurso, a través de bombas de calor geotérmicas en sistemas cerrados verticales en regiones del sur de Chile.

El sistema cerrado vertical se evalúa basado en la densidad de calor extraíble específico que cada sedimento y/o roca posee (Norma VDI 46401). Se considera el material bajo la superficie del terreno como una superposición de capas de sedimento y/o roca, con límites fijos y estáticos. El calor total extraíble en cada punto geográfico corresponde a la combinación ponderada de las capas consideradas bajo la superficie del terreno. En consecuencia, la evaluación permite estimar la densidad de energía calórica (Wt/m), que puede ser extraída por unidad de distancia vertical que ocupa el captador de calor.

En este estudio se determinaron los valores de calor de extracción de los depósitos que componen las unidades hidrogeológicas en la depresión central de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y parte norte de la región de Los Lagos, considerando la Norma VDI 4640, que traduce las características granulométricas y del agua subterránea en un valor energético, obtenidas a partir del análisis de sondajes para captar agua subterránea.

En la región de La Araucanía los valores promedios comunales se determinan y clasifican en bajos, entre 20 y 35 Wt/m (Angol, Renaico, Victoria, Ercilla y Collipulli), intermedios, entre 30 y 50 Wt/m (Loncoche, Gorbea, Villarrica, Vilcún, Lautaro, Perquenco, Temuco, Padre Las Casas y Traiguén) y altos, entre 40 y 60 Wt/m (Freire, Pitrufquén y Nueva Imperial).

En la región de Los Ríos los valores promedios comunales se determinan y clasifican en bajos, entre 25 y 50 Wt/m (Futrono, Lago Ranco y Panguipulli), intermedios, entre 35 y 55 Wt/m (Mariquina, Máfil, Río Bueno, La Unión, Los Lagos, Paillaco y Valdivia) y altos, entre 50 y 65 Wt/m (Lanco).

En la región de Los Lagos los valores promedios comunales se determinan y clasifican en bajos, entre 25 y 50 Wt/m (Llanquihue, Calbuco, Los Muermos, Río Negro y San Pablo), intermedios, entre 30 y 55 Wt/m (Puerto Montt, Osorno, Puerto Varas, Puerto Octay, Frutillar, Purránque y Fresia) y altos, entre 40 y 65 Wt/m (Mauñín y Puyehue).

En general, los resultados obtenidos muestran que los valores altos de densidad de calor en estas regiones se asocian a unidades libres en depósitos no consolidados de alta importancia hidrogeológica. Mientras que, los valores bajos se relacionan con unidades confinadas de media a baja importancia hidrogeológica, tanto en depósitos no consolidados como en roca fisurada (región de Los Lagos).

En las regiones estudiadas, cinco comunas (Padre Las Casas, Osorno, Puerto Varas, Valdivia y La Unión) están dentro de las veinte más contaminadas del país según material particulado fino MP 2.5 (Ranking Aires Nuevos 20212). Sin embargo, estas comunas poseen valores de densidad de calor de extracción medio-alto que permitirían la implementación de sistemas geotérmicos de calefacción cerrado vertical como una alternativa de costo eficiente para proveer calor mediante una fuente energética limpia y renovable.

Palabras Clave: Climatización, Geotermia, Calor.

Referencias:

- [1] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. (2001). Thermische Nutzung des Untergrundes. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. VDI 4640 Blatt 2. Düsseldorf.
- [2] https://www.futuro360.com/desafiotierra/rankin-comunas-chile-peor-calidad-aire_20220204/

Doble capa sello del sistema geotermal de Llolli, Región del Maule (Chile)

Macarena Arias Barahona¹, Santiago Maza¹, Diego Morata¹, Germain Rivera², Gianni Volpi²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Enel Green Power Chile y Países Andinos, Av. Santa Rosa N°76, Santiago, Chile

Este trabajo se centra en el estudio de la mineralogía de alteración del testigo de roca de 901 m de profundidad del Pozo Llolli-1 del proyecto geotermal Calabozo, llevado a cabo por la ENG (Empresa Nacional de Geotermia S.A.) en 2009. El testigo se extrajo de la zona de Vegas El Pangal, comuna de Curicó, región del Maule, Chile. En este sector se ha documentado la presencia de aguas termales en superficie alcanzando 94 °C, siendo la media 45 °C, las cuales se utilizan para turismo y bañoterapia (Gainza, 2014). Por su parte, el perfil de temperatura del pozo alcanzó 182 °C a los 889 m de profundidad, lo que permitió proponer un reservorio geotermal bajo los 1.700 m y con temperaturas de 260 °C (Rivera et al., 2009).

El informe técnico Rivera et al. (2009) se utilizó como antecedente para guiar y contrastar la información encontrada con la ya existente, además de realizar un muestreo sistemático cada 30 m de los 901 m de testigo de rocas, para ser analizados mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM, siglas en inglés).

La secuencia litológica consiste en los primeros 21 m de sedimentos no consolidados; seguidos entre los 21 y 420 m por niveles evaporíticos de la Fm. Auquico, que se alternan con niveles de areniscas, conglomerados y rocas andesíticas de la Fm. Nacientes del Teno; seguido por una potente unidad de 220 m de rocas volcánicas constituidas por tobas, lapilli, tobas de lapilli y brechas de la Fm. Coya-Machali. Entre los 640 y 846 m se desarrolla una alternancia de secuencias calcáreas y clásticas de la Fm. Nacientes del Teno y Fm. Río Damas con intercalaciones de andesitas basálticas, mientras que entre los 846 y 858 m se reconocen microdioritas cuaríferas. La secuencia finaliza en los 901 m con alternancia de andesitas, areniscas y anhidritas. Esta secuencia, caracterizada por la repetición de sus unidades sedimentarias, sería el producto de una intensa tectónica afectada por fallas inversas y posibles pliegues.

Los resultados obtenidos de mineralogía de alteración de los primeros 500 m del testigo muestran un predominio de fases arcillosas y de zeolitas, junto a sulfatos, carbonatos y, en menor proporción, sulfuros y óxidos de Fe. En los niveles superficiales de evaporitas (100–190 m), se encontraron asociaciones de calcita (36%) + cuarzo (32%) + laumontita (11%) + clorita (10%) + illita (6%) ± ankerita (2%) ± siderita (1%) ± montmorillonita (1%) ± pirita (<1%) desarrollados en los niveles volcánicos. En los niveles evaporíticos se encontró una asociación de anhidrita (77%) + laumontita (8%) + calcita (7%) + cuarzo (5%) + ankerita (3%) ± pirita (<1%), donde estos se mantienen inertes a la alteración. En los 190 m se da el contacto entre rocas evaporíticas con areniscas y conglomerados, donde se identifica illita en proporciones que alcanzan el 27%. De los 250–420 m se repite de nuevo la unidad evaporítica seguida por las areniscas y conglomerados con similar asociación de calcita (22%) + cuarzo (17%) + illita (14%) + clorita (13%) + anhidrita (12%) + dolomita (7%) + laumontita (7%) ± siderita (3%) ± hematita (1%) ± ankerita (1%) ± esmectita (1%) ± magnesita (<1%) ± pirita (<1%) en los niveles de areniscas y rocas volcánicas. Luego de los 420 m, la alteración desarrollada en la unidad volcánica presenta variaciones en la mineralogía de alteración, siendo las fases arcillosas dominantes a partir de este nivel. Consiste de altas proporciones de illita (35%) + dolomita (24%) + cuarzo (19%) + clorita (7%) + siderita (6%) ± calcita (2%) ± ankerita (1%) ± montmorillonita (1%) ± hematita (1%). Además, se identificaron arcillas esmectíticas, compuestos de interestratificados illita/esmectita, en baja proporción.

Los resultados preliminares muestran que la asociación de calcita + laumontita + clorita + cuarzo, desarrollada en los niveles andesíticos intercalados entre las unidades evaporíticas (21–420 m), indica fluidos de pH neutros, ricos en Ca, con temperaturas ~180 °C y asociados a una alteración propilítica incipiente. Por otra parte, por debajo de la secuencia evaporítica-clástica, la illita acompañada de clorita junto a dolomita y siderita son compatibles con fluidos neutros y ricos en K-Mg-Fe indicando temperaturas ~200 °C. Estas paragénesis son compatibles con fluidos hidrotermales del tipo baja sulfuración y posiblemente asociados a reservorios geotermiales profundos. Además, la presencia de illita y arcillas esmectíticas manifiestan la mineralogía de la primera capa sello (~450–850 m) del sistema actual que estaría en concordancia con el perfil de temperatura del pozo. Por su parte, la secuencia evaporítica estaría actuando como segunda capa sello del sistema produciendo una alta eficiencia en la conservación del calor geotermal.

Palabras Clave: illita, esmectita, anhidrita, fluidos geotermiales, Calabozo.

Financiamiento: Se agradece al Centro de Excelencia de Geotermia de los Andes por proporcionar el financiamiento del equipo necesario para realizar los estudios.

Agradecimientos: Se agradece a Enel Green Power por la donación del testigo Llolli-1 al CEGA. Asimismo, se agradece a las estudiantes Belén Cabello y Alexandra Núñez por su colaboración.

Referencias:

- Gainza Acevedo, V. (2014). Estimación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, en la cuenca del Maule, entre los 35,2° y 35,6°S. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132686>
- Rivera, G.; Ramírez, C.; Vidal, A. y González, M. (2009). Informe técnico: Proyecto Calabozo, Informe final pozo Llolli 1. ENG (Empresa Nacional de Geotermia S.A.)

Microstructural controls on thermally-induced crack damage in intrusive rocks

John Browning¹, Philip Meredith², Thomas Mitchell², Ali Daoud², Agust Gudmundsson³

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile

(2) University College London

(3) Royal Holloway, University of London

Crack damage due to thermal stresses can be induced in rocks during heating, under all-round compression or during cooling, under all-round tension; and is commonly also enhanced by temperature cycling. Whilst there remains a paucity of data relating to cyclic thermal stressing in rocks, previous studies have demonstrated that, for some rocks the great majority of thermal cracking is generated during heating, while for other rocks most of the cracking is generated during cooling. Here we discuss results from a series of novel experiments designed to capture acoustic emission (AE) (or micro-seismic) signals associated with the heating and cooling of three different igneous rocks (a quartz-rich granophyre from the Skafrudalur pluton in Iceland, and two quartz-poor rocks; a dacite from Santorini and a basalt from Iceland) over emplacement-relevant temperatures. The dacite, from the Nea Kameni lavas, has a porphyritic texture dominated by plagioclase, pyroxene, iron oxides and rare sanidine with an initial porosity of around 10%. The basalt, Seljadalur basalt, is a well-characterised intrusive sill, with an initial porosity of around 4% and comprised of an intergranular matrix of plagioclase, granular pyroxene and iron oxides. The Skafrudalur granite is comprised predominantly from interlocking quartz grains. Sample cores, 75 mm x 25 mm, were placed inside a tube furnace and subjected to temperature cycling up to 1000°C. The samples were held in purpose-built apparatus that was able to both contract and expand so as to maintain contact with the sample and act as a wave guide for propagating elastic waves induced by fracturing events. AE was monitored continuously along with temperature and all experiments were performed at ambient pressure conditions. By comparing the micro-seismicity with analysis of each rock's microstructure we have been able to determine key processes related to differential thermal cracking. We observed that thermal cracking during heating was dominant in coarse-grained, quartz-rich rocks, while instead cracking during cooling was dominant in finer-grained, quartz-poor rocks. Since all the experiments were conducted under an identical protocol, we conclude that the difference in behaviour is a product of the differences in rock composition and internal micro-structures. These results may be useful in determining the natural seismic response following shallow crustal magma intrusion and cooling and the formation of thermal cracks during cooling may aid the development of permeable fluid-flow paths in geothermal settings.

Palabras Clave: Thermal stress, Thermal Cracking, Igneous Rocks, Geothermal, Reservoir Stimulation.

Estimación del potencial geotérmico del sector poniente del Gran Santiago (33,5°S) y los beneficios de su uso directo

Andrés Courard Maturana¹, Linda Daniele¹⁻², Matías Taucare¹⁻², Diego Morata¹⁻²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

Frente a la actual crisis climática a la cual el mundo se está enfrentando (IPCC, 2023), se hace necesario buscar alternativas sustentables para solventar nuestras necesidades básicas como seres humanos, entre ellas la misma habitabilidad. Actualmente, la mayoría de las personas del mundo están viviendo en áreas urbanas (Vargas et al., 2022), y se espera que siga esta tendencia en el futuro (ONU, 2018). Esto es preocupante considerando que se estima que las zonas urbanas son responsables del 60 al 70% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (ONU, 2011).

Globalmente, la energía necesaria para calentar, enfriar y operar un edificio corresponde al 28% de las emisiones de carbono relacionadas al uso energético (World Green Building Council, 2019). Además, el 53% del consumo energético residencial se destina a climatización (In - Data SpA & CDT, 2019). Considerando lo anterior, avanzar hacia la descarbonización de la industria de la climatización (tanto en edificios residenciales como industriales) es un gran paso hacia la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y, con esto, mitigar los efectos del cambio climático.

Una opción para lograr este cometido es hacer uso de la energía geotérmica, particularmente la energía geotérmica somera, presente en prácticamente todo el territorio, ya que no necesita de anomalías geotérmicas para su aprovechamiento (Banks, 2012). El uso de la geotermia somera, al estar aprovechando la energía presente dentro del mismo territorio, aporta a la independencia energética de los países y al fortalecimiento de la seguridad energética.

En este estudio se propone calcular el potencial geotérmico de baja entalpía de la comuna de Maipú, con el fin de establecer zonas de interés geotérmico y analizar la factibilidad y beneficios, tanto medioambientales como económicos, del uso de esta energía en comparación con otras fuentes de energía convencionales y no convencionales.

Analizando las propiedades acuíferas de la zona de estudio, y utilizando una adaptación de la metodología propuesta por Epting et al. (2020) se propuso calcular su potencial geotérmico para climatización, y compararlo con los requerimientos de climatización urbana y el porcentaje que podría ser abastecido por geotermia de baja temperatura. Finalmente se han contrastado los costos y beneficios del uso directo de la geotermia frente a fuentes de energía utilizadas para climatización.

Los datos preliminares indican que el acuífero tiene una temperatura de entre los 16 y 19°C, y el nivel piezométrico se sitúa entre los 20 y 80 metros de profundidad dependiendo del sector. Los datos hidrogeoquímicos revelan la presencia de aguas con conductividad eléctrica de entre 400 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y pH entre 7,45 y 8,11. Estos datos preliminares sugieren que es viable utilizar el calor del acuífero, en especial en zonas donde el nivel piezométrico es más somero, o tiene una mayor diferencia de temperatura con respecto a la superficie.

Palabras Clave: geotermia, hidrogeología, termogeología, geotermia somera.

Financiamiento: Este trabajo es una contribución al Proyecto ATE220029 “The water-energy-food nexus for urban areas in central Chile (wef-Chile)” financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) en el concurso Anillo de Investigación en Áreas Temáticas Específicas 2022.

Agradecimientos: Se agradece a ANID por otorgar apoyo a esta investigación a través del Proyecto ATE220029.

Referencias:

- Banks, D. (2012). An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling.
- Epting, J., Böttcher, F., Mueller, M. H., García-Gil, A., Zosseder, K., & Huggenberger, P. (2020). City-scale solutions for the energy use of shallow urban subsurface resources – Bridging the gap between theoretical and technical potentials.
- In - Data SpA, & CDT. (2019). Informe final del uso de la energía de los hogares en Chile 2018
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report.
- ONU. (2011). Cities and Climate Change: Policy Directions.
- ONU. (2018). Sustainable cities, human mobility and international migration.
- Vargas, C. A., Caracciolo, L., & Ball, P. J. (2022). Geothermal energy as a means to decarbonize the energy mix of megacities.
- World Green Building Council. (2019). Bringing embodied carbon upfront.

Geotermometría de Cloritas en el Sistema Geotermal Nevados De Chillán

Cristóbal Cuevas Escalante¹⁻³, Santiago Maza Robles¹⁻³, Diego Morata Céspedes¹⁻³, Gloria Arancibia Hernández²⁻³

(1) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(2) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Chile. Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

(3) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

I. Introducción

En los Andes Chilenos, influenciados por la subducción de placas de Nazca, Sudamericana y Antártica, se observa una variedad de fenómenos geológicos, contando con más de 200 volcanes potencialmente activos y más de 300 zonas geotérmicas. A lo largo de la Zona Volcánica Sur de los Andes Centrales, la convergencia de las placas provoca una deformación en la corteza superior que se acomoda en grandes estructuras situadas en el arco volcánico moderno (Stanton-Yonge et al., 2016), constituyendo un marco favorable para el desarrollo de geotermia de alta entalpía (Aravena et al., 2016).

En la Región del Ñuble, en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), se encuentra el Sistema Geotermal de Nevados de Chillán (SGNCh), que sirve como un valioso laboratorio natural para la investigación geotérmica. El SGNCh está desarrollado en una secuencia de granitoide y hornfels fracturados y secuencia volcánica (Morata et al., 2023). La presencia de fallas y fracturas facilita la circulación de fluidos hidrotermales, mientras que la actividad volcánica ha dado lugar a diversas formaciones geológicas, como estratovolcanes, calderas y flujos piroclásticos, destacando entre ellas los subcomplejos Cerro Blanco y Las Termas (Morata et al., 2023). En áreas como Las Termas y Valle Hermoso, se observan manifestaciones geotermiales superficiales significativas, con aguas termales ácido-sulfatadas con temperaturas que oscilan entre 85 y 92 °C. Estas aguas son el resultado de la ebullición de agua de alta temperatura en el subsuelo y la mezcla de vapor con aguas superficiales, lo que conduce a la oxidación de H_2S a H_2SO_4 y a la lixiviación de las rocas volcánicas. Este sector ofrece un alto potencial y relevancia para el estudio y aprovechamiento de la geotermia.

El pozo de exploración Nieblas-1, ubicado en el SGNCh, permite un estudio detallado del sistema. Investigaciones recientes de Gallardo (2020) y Morata et al. (2023) documentan las características principales de litología, permeabilidad; alteración hidrotermal y principales estructuras asociadas con el sistema. Además, se han efectuado mediciones directas de la temperatura en el pozo, complementadas con estudios de microtermometría, permitiendo así obtener un perfil de temperatura detallado a lo largo del pozo. Todos estos datos enriquecen el estudio al ofrecer información precisa sobre las condiciones térmicas del sistema. A lo largo del testigo, Morata et al. (2023) identificaron dos zonas permeables: una superior (170 - 300 m) y otra inferior (610 - 700 m). Además, se encontraron diferentes asociaciones minerales, cuya distribución parece estar influenciada por las fluctuaciones de temperatura. El estudio muestra una zonación vertical de la mineralogía de alteración, con una zona argílica superior (primeros 350 m), una zona de alteración sub-propilítica intermedia (350 - 680 m) y una zona propilítica profunda (680 - 1.000,85 m).

Se ha observado en el sistema geotermal, a través del pozo de exploración, una distribución pervasiva de clorita y presencia intermitente de illita. La distribución y las características particulares de la clorita, tales como su tipo de distribución, composición química, estructura cristalina y morfología, representan una oportunidad única para realizar un estudio cristaloquímico detallado y aplicar métodos termométricos químicos en un entorno geotermal bien definido, y comprender la evolución y comportamiento de estos minerales bajo las condiciones térmicas y geoquímicas específicas de la región. Mediante un análisis de detalle (DRX y SEM-EDX), se busca descifrar las propiedades y las transformaciones en respuesta a las condiciones geotérmicas y geoquímicas de las cloritas. Lo que puede ser fundamental para la aplicación de geotermómetros químicos y para el análisis en profundidad de las fluctuaciones en la composición química de este mineral de arcilla. El objetivo de esta investigación, por tanto, es evaluar el nexo de los geotermómetros químicos de clorita con las variaciones espaciales de sus parámetros cristaloquímicos conforme el quimismo del SGNCh. Este enfoque proporcionará una visión más precisa de la dinámica actual y pasada del sistema geotermal, aportando una comprensión más completa de su evolución y funcionamiento. Este trabajo no solo permitirá profundizar en el entendimiento de la cristaloquímica de este mineral arcilloso, sino también tiene el potencial de mejorar la práctica de geotermometría y el estudio de los sistemas geotermiales para los Andes Chilenos.

II. Metodología

Del pozo Nieblas-1, que tiene una longitud de 1000.85 m, tras un estudio petrográfico detallado, se seleccionan 11 muestras para los estudios de geotermometría en clorita. Estas se ubican a los 60, 100, 255, 307, 476, 579, 745, 763, 833, 935, 985 m de profundidad (Figura 1.A). Todas las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un SEM FEI Quanta 250 equipado con detectores de electrones retrodispersados y espectrometría de rayos X dispersiva en energía (EDX), en el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, en la Universidad de Chile, para obtener una visión detallada de las morfologías, microdominios, secuencias temporales y composición química. Se incorporan variables locales como se visualiza en la Figura 1.A. Se investiga el "factor estructural", un parámetro ideado para cuantificar la prevalencia relativa de vetillas en las muestras mediante recuento por unidad de área, para señalar el efecto de la circulación de fluidos o permeabilidad. También se mide el grado de albitización para establecer el grado de alteración, para indicar un entorno más reactivo por una mayor razón fluido/roca. Esta información se complementa con la intensidad de alteración según el criterio de Giffing et al. (2005).

De las 11 muestras seleccionadas para estudios SEM-EDX, se seleccionan 7 a los 100, 255, 476, 745, 763, 935, 985 m, para realizar su análisis por difracción de rayos X (DRX) en la fracción desorientada <2 mm utilizando un difractómetro Bruker D8 Advanced, con radiación $CuK\alpha$, un voltaje de 40 kV y una corriente aplicada de 30 mA, en el Departamento de Física, de la Universidad de Chile. A estos datos se realiza un refinamiento Rietveld con el software Profex para examinar en profundidad las variables cristalinas.

La información composicional obtenida se organiza en diversos diagramas, estudiando la variación química de las cloritas en relación con la profundidad y las diferentes sustituciones catiónicas a lo largo del pozo. A partir de los resultados del refinamiento tipo Rietveld, se construye un modelo tridimensional de la estructura de clorita y se estiman los parámetros de red, además de la longitud de los enlaces en las diferentes posiciones de la estructura mineral, con el software VESTA en combinación con el módulo BondStr del programa FullProf. Finalmente, se aplican varios métodos geotermométricos, tanto empíricos como semi-empíricos, para determinar las temperaturas de cristalización de las cloritas.

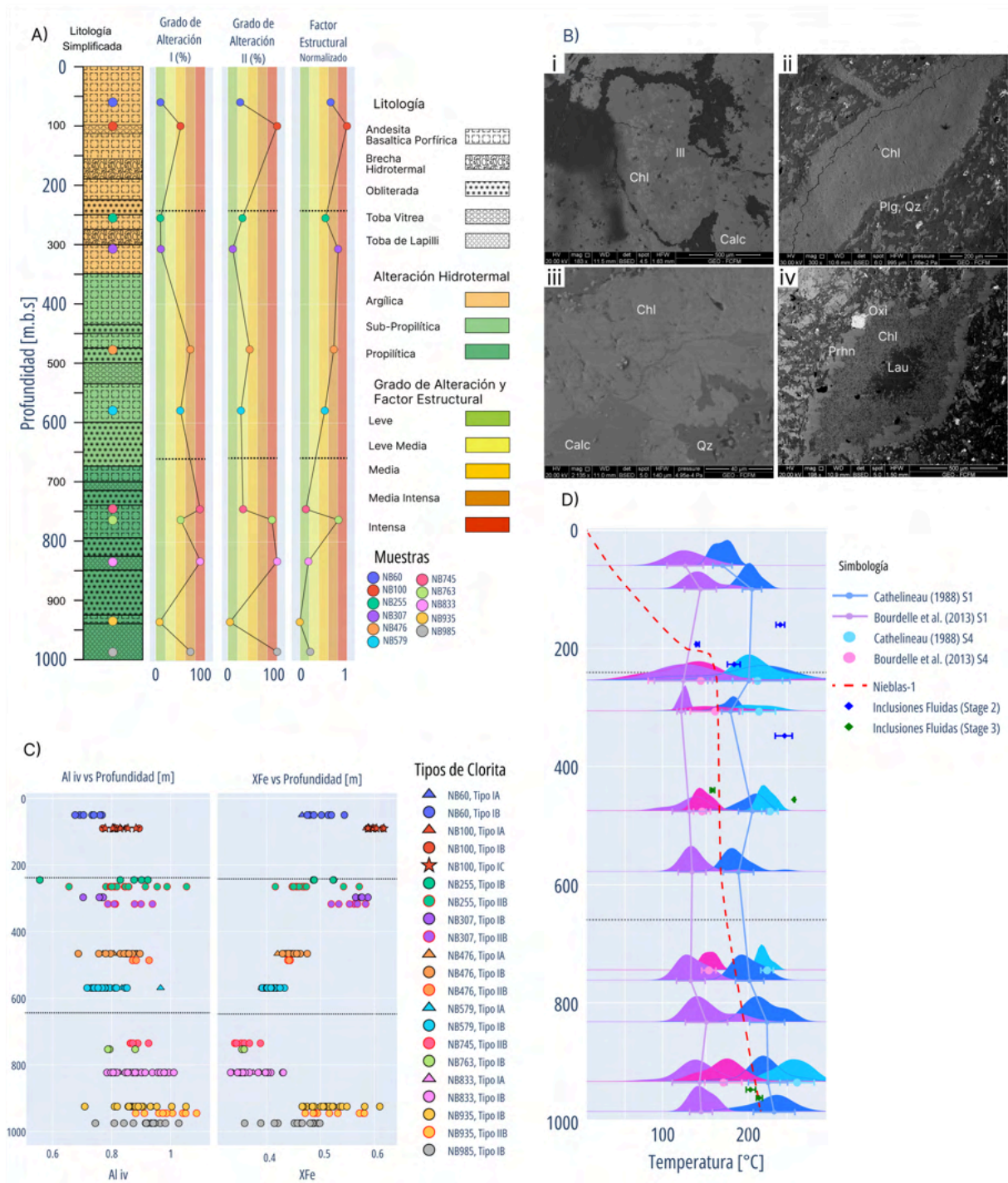


Figura 1: A) Esquema de la litología del pozo Nieblas-1. Se detalla la distribución de las unidades litológicas, profundidades en las que se extrajeron las muestras para el presente estudio y parámetros petrográficos. Grado de Alteración I (según criterio de Gifking et al., 2005). Grado de Alteración II, basado en la albitización de las plagioclasas (determinado mediante SEM-EDX). Factor Estructural, derivado de la densidad de vetillas por área en la muestra. B) Imágenes SEM de los cuatro tipos de cloritas. C) Quimismo según profundidad. D) Comparación de las temperaturas promedio obtenidas a través del geotermómetro de clorita por profundidad y etapa formativa. Líneas negras punteadas indican el límite inferior de la zona dominada por el calentamiento por vapor y el límite inferior del clay cap.

III. Resultados

Las cloritas en el SGNCh se categorizan en dos tipos (I y II) y tres microdominios (A, B, C). Los Tipos I y II correspondientes a la etapa inicial y más reciente en el desarrollo del sistema, respectivamente, basándose en las relaciones de corte y crecimiento entre minerales según la etapa evolutiva del sistema. En cuanto a los microdominios; el A se refiere al pseudomorfismo de minerales primarios o alteración de la matriz; el B se refiere al relleno de espacios abiertos (vesículas, relleno de fisuras minerales y vetillas), y el C hace mención a la precipitación de clorita y calcita debido a la brechización hidrotermal.

Las imágenes SEM exhiben cuatro tipos de cloritas Tipo IA, IB, IC (Etapa 1) y IIB (Etapa 4), con una estructura cristalina trioctaédrica, en su mayoría de composición de diabantita, con variaciones hacia picnoclorita y/o brungvrgita; Tipo IA (Figura 1.B.i) se encuentran a las profundidades de 60, 100, 476, 579 y 833 m; Tipo IB (Figura 1.B.ii) con mayor desarrollo a lo largo del testigo se identificó a los 60, 100, 255, 307, 476, 579, 763, 833, 935 y 985 m y las Tipo IC (Figura 1.B.iii) se distingue únicamente a los 100. Finalmente, las Tipo IIB (Figura 1.B.iv) están presentes a los 255, 307, 476, 745 y 935 m.

La composición de la fórmula estructural de las cloritas (recalculado en base a 14 Oxígenos) percibe cambios significativos en la composición de cationes de los sitios tetraédricos de Si, Al^{IV} , y de los sitios octaédricos de Al^{VI} , Fe, Mg y vacancia octaédrica ($\square$) con la profundidad. En términos generales, se aprecia una disminución en la cantidad de Si a medida que aumenta la profundidad, mientras que los niveles de Al^{IV} y Al^{VI} tienden a aumentar. Por otro lado, el Fe y Mg fluctúan considerablemente (Figura 1.C). En cuanto a la $\square$, se mantiene relativamente constante a lo largo de las diferentes profundidades estudiadas. En el caso de las cloritas Tipo IA, se observan valores promedio de Si entre 3,10 - 3,26 a.p.f.u. y del Al^{IV} entre 0,74 - 0,90 a.p.f.u.; por su parte los cationes en los sitios octaédricos presentan el Al^{VI} entre 1,10 - 1,32 a.p.f.u., Fe entre 1,82 - 2,18 a.p.f.u., y Mg entre 2,50 - 2,62 a.p.f.u., $\square$ varía entre 0,18 - 0,23 a.p.f.u. y la fracción molar de Fe (XFe) oscila entre 0,37 - 0,59. Para las cloritas Tipo IB, los valores promedio son: Si alrededor de 3,09 - 3,28 a.p.f.u., Al^{IV} entre 0,72 - 0,91 a.p.f.u.; mientras que los cationes en los sitios octaédricos, Al^{VI} entre 1,19 - 1,37 a.p.f.u., Fe entre 1,58 - 2,73 a.p.f.u., y Mg entre 1,81 - 2,85 a.p.f.u., la $\square$ varía entre 0,20 - 0,29 a.p.f.u., y XFe oscila entre 0,36 - 0,60. En el caso de la clorita Tipo IC, los valores son: Si 3,18 a.p.f.u., Al^{IV} 0,82 a.p.f.u.; en tanto para los cationes en los sitios octaédricos, Al^{VI} 1,22 a.p.f.u., Fe 2,71 a.p.f.u., Mg 1,80 a.p.f.u., $\square$ 0,21 a.p.f.u., y XFe 0,6. Para las cloritas Tipo IIB, se registran valores de Si entre 3,01 - 3,15 a.p.f.u., Al^{IV} entre 0,85 - 0,99 a.p.f.u., Al^{VI} entre 1,20 - 1,36 a.p.f.u., Fe entre 1,62 - 2,53 a.p.f.u., y Mg entre 2,04 y 2,89 a.p.f.u., $\square$ varía entre 0,19 - 0,26 a.p.f.u., y XFe oscilan entre 0,36 - 0,55.

Los procesos de intercambio iónico, vitales para entender la formación y evolución de las cloritas, revelan una fuerte relación 1:1 para el intercambio ferromagnesiano ($Fe = Mg$) y la sustitución Tschermak ($Si + R^{2+} = Al^{total}$), y una relación cercana a 1:2 para la sustitución di-trioctaédrica ($2Al^{VI} + \square^{VI} = 3R^{2+}$). No obstante, la relación 1:1 entre Al^{VI} y Al^{IV} , clave para una sustitución completamente Tschermak, no se aprecia. A pesar de las expectativas de una correlación robusta entre Mg con Al^{VI} , Al^{IV} , Si y Fe en zonas de alteración hidrotermal, solo se percibe una correlación significativa con Fe. La relación entre el contenido de Al^{IV} y la razón XFe es débil, lo que cuestiona las correcciones implementadas en los geotermómetros empíricos para ajustar la composición de la roca caja.

El estudio de la estructura cristalina de la clorita, determinada por los parámetros de red a, b, y c, y el ángulo interaxial β , revela una relativa constancia con respecto a la profundidad. Las longitudes de los ejes varían en rangos de 5,354 - 5,364 Å, 9,2742 - 9,3206 Å, y 14,2871 - 14,3 Å, mientras que el ángulo β se sitúa entre 96,532° - 96,942°. Aunque, es importante destacar que el ángulo β muestra una tendencia a aumentar de manera discreta con la profundidad.

El estudio empleó varios métodos empíricos y semiempíricos de geotermometría para determinar las temperaturas de cristalización de la clorita en el SGNCh como se señala en la Figura 1.D. Los resultados mostraron que estas temperaturas incrementan a mayor nivel subterráneo. Los métodos empíricos de Cathelineau (1988), Kranidiotis y MacLean (1987) proporcionaron resultados similares, variando entre 171 - 252°C. Mientras tanto, los métodos semi-empíricos de Bourdelle (2013) e Inoue (2009, 2018) indicaron temperaturas entre 118 - 162°C. Se notó que los métodos semi-empíricos tienden a subestimar las temperaturas de cristalización en comparación con los empíricos. Las temperaturas observadas son coherentes con la medición directa de la temperatura del pozo a partir de los 200 m. Se observó que las cloritas en la Etapa 4 presentaron temperaturas de cristalización más altas (211 - 258°C) que las de la Etapa 1 (170 - 231°C), considerando las diferentes profundidades a las que se encontraron (Figura 1.D).

IV. Discusión y Conclusiones

Este trabajo permitió la identificación de cloritas tanto de una etapa de alteración temprana como tardía, contrariamente a la suposición inicial de que todas se originaron en la etapa de calentamiento del sistema (Gallardo, 2020; Morata et al., 2023). Las Cloritas Tipo IA y IB surgieron al comienzo de la Etapa I durante el calentamiento del sistema, mientras las Tipo IC se formaron en esta misma etapa tras el evento de brechización en la zona superior. A diferencia, las Cloritas Tipo IIB se desarrollaron en el cierre de la Etapa 4 después de un evento de brechización en la región inferior. Las morfologías recurrentes de lentes curvos a lo largo del pozo, junto con el alto contenido de Si, son característicos de las cloritas geotermales.

Con respecto a la variación catiónica, la composición del mineral se mantiene relativamente homogénea tanto a nivel de microdominio como temporal a profundidades constante, pero varía sustancialmente con la profundidad. Los elementos en la capa tetraédrica se asocian a un control térmico, mientras que los cationes en la capa octaédrica al no mostrar una correlación directa con la temperatura o las variables locales (Figura 1.A,C), se asocian a un control por la fugacidad de oxígeno. Los valores de XFe y su disminución desde la superficie y fondo del pozo hacia los 800 m, sugiere su origen por fluidos predominantemente reductores, con un incremento relativo en la fO_2 en torno a esta profundidad (de Caritat et al., 1993), posiblemente por la influencia de fluidos meteóricos circundantes. Esto implica que a medida que los fluidos ascienden por convección, simultáneamente experimentan procesos de reducción. Además, la formación de estas cloritas más férricas podría ser promovida por los procesos de ebullición durante la Etapa I (Wu et al., 2019; Morata et al., 2023).

Las cloritas de la Etapa 4 (IIB) frente a las de la Etapa 1 (IB) a igual profundidad, presentan una marginal disminución en Si, XFe, e incremento en Al, Mg (Figura 1.C). Sugiriendo que, al cierre de la Etapa 4, la disponibilidad de Al, y las condiciones de T° , fO_2 y/o pH podrían ser casi idénticas o haber aumentado muy ligeramente en comparación con las que prevalecían en la Etapa 1 (de Caritat et al., 1993). En otras palabras, las condiciones actuales observables son notablemente parecidas a las del calentamiento inicial del sistema.

Se hallaron discrepancias entre los métodos empíricos y semiempíricos (Figura 1.D), posiblemente por una desviación en las condiciones termodinámicas en las cuales se basan estos últimos. Los geotermómetros empíricos arrojan resultados bastante consistentes con las condiciones del sistema. Se concluye que el geotermómetro de Cathelineau proporciona los resultados más confiables al no depender de una corrección de Al por XFe.

El estudio geotermométrico de las cloritas del SGNCh muestra variaciones en la temperatura entre las diferentes etapas de alteración definidas por Morata et al., (2023). Las cloritas IA, IB, IC desarrolladas en la Etapa 1, tienen rangos de temperaturas promedio de 176-228°C, 170-231°C y 203°C, respectivamente.

Por otro lado, las cloritas IIB, desarrolladas al final de la Etapa 4 son de 211-258°C. Las temperaturas podrían representar las condiciones térmicas predominantes durante las etapas de alteración respectivas. Estos datos, sumado a la falta de correlación entre el Mg con la mayoría de los elementos mayores, indican que durante la Etapa 1 y 4 ocurrieron múltiples eventos o pulsos hidrotermales, con pequeñas fluctuaciones en la composición del fluido y un rango restringido de temperatura durante la cristalización de las cloritas. El aumento de la temperatura tras los eventos de brechización (Etapas 1 y 4) pueden ser consecuencia de la infiltración de fluidos magmáticos a través de las fallas citadas en Morata et al (2023). Diversas etapas de alteración han generado dos dominios distintos en el sistema: uno hidrotermal profundo y otro constituido por una zona calentada por vapor en la parte superior del clay cap. Este último, como se menciona en Morata et al. (2023) ha mostrado un proceso de enfriamiento a lo largo del tiempo, influenciado por factores como la precipitación de minerales secundarios que sellan el sistema y la mezcla de fluidos infiltrados. La evidencia de este fenómeno es visible al comparar las temperaturas medidas directamente del pozo con las de cristalización de las cloritas en los primeros 200 m. De este modo, la geotermometría de las cloritas no solo proporciona datos de interés, sino que también pone de manifiesto la relevancia del clay cap en la regulación térmica del sistema, actuando como una barrera que limita la circulación de fluidos.

Palabras Clave: Cloritas, Geotermometría, Andes chilenos, Geotermia.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) y el proyecto ANID Fondecyt Regular #1220729.

Referencias:

- Aravena, D., Muñoz, M., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M. Á., & Dobson, P. (2016). Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile. *Geothermics*, 59, 1–13.
- Bourdelle, F., Parra, T., Chopin, C., & Beyssac, O. (2013). A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(4), 723–735.
- Cathelineau, M. (1988). Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*, 23(4), 471–485.
- de Caritat, P., Hutcheon, I., & Walshe, J. L. (1993). Chlorite geothermometry: A review. *Clays and Clay Minerals*, 41(2), 219–239.
- Gallardo, R. (2020). Evolución hidrotermal del sistema geotermal Nevados de Chillán. 2017(1), 1–9.
- Gifkins, C., Herrmann, W., & Large, R. R. (2005). *Altered Volcanic Rocks: A Guide to Description and Interpretation*. Centre for Ore Deposit Research.
- Inoue, A., Inoué, S., & Utada, M. (2018). Application of chlorite thermometry to estimation of formation temperature and redox conditions. *Clay Minerals*, 53(2), 143–158.
- Inoue, A., Meunier, A., Patrier-Mas, P., Rigault, C., Beaufort, D., & Vieillard, P. (2009). Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites. *Clays and Clay Minerals*, 57(3), 371–382.
- Kranidiotis, P., & MacLean, W. H. (1987). Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82(7), 1898–1911.
- Morata, D., Gallardo, R., Maza, S., Arancibia, G., Camila, L., Mura, V., Cannatelli, C., & Reich, M. (2023). Hydrothermal Alteration in the Nevados de Chillán Geothermal System, Southern Andes: Multidisciplinary Analysis of a Fractured Reservoir.
- Stanton-Yonge, A., Griffith, W. A., Cembrano, J., St. Julien, R., & Iturrieta, P. (2016). Tectonic role of margin-parallel and margin-transverse faults during oblique subduction in the Southern Volcanic Zone of the Andes: Insights from Boundary Element Modeling. *Tectonics*, 35(9), 1990–2013.

Evaluación del Potencial Geotermal de Baja Entalpía para el Uso Agrícola en la Zona de la Cuenca de Limache, Región de Valparaíso, Chile

María Renee Díaz Santos¹, Silvio Ferraris Barona²

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota #980, Viña del Mar, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

La Energía Geotérmica es aquella única fuente inagotable de energía renovable contenida al interior de la Tierra, que puede ser almacenada y extraída gracias a las distintas propiedades termales que presenta el subsuelo.

El presente estudio trata de evaluar la caracterización térmica, para el aprovechamiento energético mediante sistemas geotérmicos de baja entalpía, dadas las características fisicoquímicas, térmicas y geológicas. La Comuna de Limache, es distinguida por presentar una producción agrícola basada en el cultivo del tomate "Limachino", hortaliza que presenta un periodo corto de cosecha (exclusivamente en épocas de verano), debido a esto, se pretende amortiguar las temperaturas del sector, mediante la climatización de espacios, con la finalidad de ayudar a los agricultores a presentar más de una cosecha al año.

Para determinar la cantidad de energía disponible en el sector, se procedió a realizar una recopilación exhaustiva de datos, tanto bibliográficos como en terreno, mediante la utilización de imágenes multiespectrales, para la estimación de la temperatura superficial; análisis geológicos para la definición de las secuencias estratigráficas y estudios hidrogeológicos junto con cálculos matemáticos propuestos principalmente por Hillel (1982) para la determinación de las temperaturas a una cierta profundidad.

De estas metodologías se obtiene para la Comuna de Limache una temperatura ambiental de 16,1°C que corresponde a la variación de temperaturas máximas y mínimas registradas en la zona para el año 2020. Por otro lado, el material que constituye el suelo fue caracterizado por arenas y gravas saturadas en agua, lo que indica una temperatura subterránea promedio de 15,15°C a 13 m de profundidad, punto en el cual las variaciones de temperaturas ambientales no influyen en la temperatura subterránea.

Finalmente, utilizando valores de caudales estipulados por la DGA se ha estimado una energía extraíble del acuífero de 223,2 kW, con lo que se puede suplir la demanda energética para aproximadamente 5 invernaderos de 150 m² de dimensión.

Por lo que, el potencial geotérmico de la zona de Limache, permite el intercambio de calor hacia la superficie, con la finalidad de ejercer la climatización de invernaderos contribuyendo al desarrollo agrícola y comunitario.

Palabras Clave: Energía Geotérmica, Baja Entalpía, Energía Renovable, Temperatura Subterránea.

Referencias:

- Allansdottir, A., Pellizzzone, A., & Sciallo, A. (2019). Geothermal Energy and Society. Springer International Publishing.
- Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. España.
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J., & Korkka-Niemi. (2014). Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. Geothermal Energy, 2(1), 1.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, 3-65.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la Energía Geotérmica? Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia.
- Dirección General de Aguas. (2014). Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común, Áreas de Restricción, Valle del Estero Casablanca. STD N°345.
- Hillel, D. (1982). Soil Temperature and Heat Flow. Introduction to Soil Physics, 155-175.
- Hillel, D. (2012). Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields. Elsevier.
- Lahsen, A. (1976). Geothermal Exploration in Northern Chile. Geothermal Energy.
- Lahsen, A., Rojas, J., Morata, D., & Aravena, D. (2015). Geothermal exploration in Chile: contry update. In Proceedings, World Geothermal Congress.
- Llopis, G., & Rodrigo, V. (2008). Guía de la Energía Geotérmica. Madrid, España: Dirección General de Industria, Energía y Minas, Consejería de Economía y Consumo, Comunidad de Madrid.
- Lund, J., & Boyd, T. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics, 60, 66-93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>.

Modelación de sistemas geotermales fracturados en COMSOL Multiphysics: el caso de estudio del Complejo Volcánico Nevados de Chillán

Isa Oyarzo Céspedes¹⁻², Gloria Arancibia¹⁻², Diego Morata²⁻³, Camila López Contreras¹⁻², Valentina Mura¹⁻², Santiago Maza²⁻³

(1) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(3) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

1. Introducción

El cambio climático ha despertado un gran interés a nivel mundial en el conocimiento sobre las energías renovables, buscando disminuir la dependencia del gas y otros combustibles fósiles. Dentro de las energías renovables no convencionales se encuentra la energía geotérmica, la cual corresponde al aprovechamiento del calor interno de la Tierra. Esta energía se puede utilizar de forma sostenible, lo que significa que el sistema de producción es capaz de mantener el nivel de producción durante mucho tiempo sin un impacto significativo en el ambiente natural. En general, si la tasa de producción es menor a la recarga natural del reservorio geotermal, el recurso seguirá siendo sostenible en el mediano y largo plazo.

Sin embargo, la explotación geotérmica excesiva, principalmente por motivos económicos, puede traer como consecuencia el agotamiento de los reservorios, lo que ocurre cuando la tasa de producción es mayor a la recarga del sistema (Rybach & Mogillo, 2006). En este caso, puede ocurrir disminución de la presión y temperatura del reservorio, incrustación de sílice en las tuberías, entre otros problemas, los cuales pueden provocar que se agote el recurso (e.g. Kaya et al., 2011). Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento que tendría el reservorio geotermal antes de empezar su explotación. Junto con ello, es necesario predecir y controlar variables críticas, tales como la recarga natural del sistema, la permeabilidad, el calor específico y la conductividad térmica de las rocas, la presencia de fracturas en la zona y la tasa de reinyección necesaria (e.g. Franco & Vaccaro, 2014; Rybach & Mogillo, 2006).

Los modelos numéricos sirven como herramienta para llevar a cabo una aproximación al comportamiento que tendrá un reservorio geotérmico en un periodo de tiempo determinado. Estos modelos numéricos se aplican sobre un modelo conceptual, el cual define las condiciones de borde del sistema de acuerdo con las características geológicas únicas del caso de interés. Por consecuencia, los modelos conceptuales y métodos numéricos son de gran ayuda cuando el objetivo es prevenir futuros problemas y saber con mayor claridad cuál es la capacidad y/o tecnología más adecuada, dadas las características geológicas específicas de un sistema (Franco & Vaccaro, 2014). Existen diversos intentos de desarrollo de modelos conceptuales de sistemas hidrotermales, los cuales muestran los elementos clave que controlan un sistema geotermal y cómo interactúan estos componentes, a medida que evolucionan los sistemas. Sin embargo, como cada uno de estos elementos afecta al desarrollo del sistema geotermal y cada sistema tiene un contexto geológico distinto, es necesaria una caracterización específica para cada sistema individual.

En esta investigación, se propone utilizar como caso de estudio el Sistema Geotermal Nevados de Chillán (SGNCh), como un ejemplo representativo de un sistema geotermal volcánico fracturado. El funcionamiento del SGNCh es controlado por la geología característica del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), principalmente debido a la presencia de lineamientos regionales de orientación NE y NW de los que se infieren zonas fracturadas en profundidad, donde la circulación de fluidos hidrotermales se ve favorecida por una alta permeabilidad secundaria (Morata et al., 2023).

El CVNCh está controlado por lineamientos de tendencia NW-SE y constituye una compleja serie de aparatos volcánicos construidos sobre las formaciones volcano-sedimentarias Cola de Zorro y Cura-Mallín, de al menos 2500 m de espesor. Las rocas volcano-sedimentarias de edad Oligoceno a Mioceno se depositaron en cuencas extensionales que fueron invertidas tectónicamente, deformando y levantando las fallas extensionales previas y el relleno sedimentario (Radic, 2010). Probablemente, y relacionados con esta inversión tectónica, granitoides miocenos (Batolito Bullileo de Santa Gertrudis) intruyeron estas unidades volcano-sedimentarias, generando un metamorfismo de contacto local en las rocas volcanoclásticas de la Formación Cura-Mallín (Morata et al., 2023).

Este trabajo presenta una propuesta teórica, mediante la cuantificación del potencial nivel de producción y del diseño ingenieril teórico, de cómo se podría aprovechar hoy el potencial geotérmico del reservorio profundo del SGNCh. Este reservorio se encontraría aproximadamente a 1.1 km de profundidad con una temperatura de 220-250°C (ENG, 2007).

2. Metodología

En este estudio se realiza un modelo numérico del SGNCh considerando sus características geológicas locales, las cuales están basadas en la información de estudios previos y los datos de terreno obtenidos en el marco de la investigación en curso (e.g. ENG, 2007; Gallardo, 2020; Morata et al., 2023). Con ello se obtienen los datos del nivel freático, temperaturas en profundidad, estratigrafía y estructuras geológicas de la zona. Además, se incluyen las propiedades relevantes para caracterizar correctamente la zona, como la conductividad térmica, porosidad, densidad y permeabilidad de las rocas del entorno. Estas propiedades se están obteniendo con ensayos de conductividad térmica y de permeabilidad. Estos parámetros serán usados como insumo para generar el modelo 2D de elementos finitos con el software COMSOL Multiphysics® utilizando el módulo *Subsurface Flow Module*, que incluye consideraciones respecto a la transferencia de calor, la dinámica de fluidos y la mecánica de rocas. Específicamente, el modelo será gobernado por la ecuación de Darcy y la ecuación de transferencia de calor, generando un modelo hidro-térmico (TH) que logra abarcar las diferentes variables ya mencionadas (COMSOL, 2020).

2.1 Definición hidráulica

Las ecuaciones que gobiernan el modelo en términos hidráulicos son la ley de Darcy (ecuación 1) en la zona no fracturada y la versión tangencial de la ley de Darcy (ecuación 2) para las zonas consideradas como medio fracturado.

Esta última, utiliza la ley cúbica para definir la permeabilidad secundaria en el medio fracturado, dadas las características de la fractura (COMSOL, 2020).

$$u = -(\kappa/\mu) \nabla p_f \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$q_f = -(\kappa_f/\mu) df \nabla T_p \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde q_f es el caudal volumétrico por unidad de largo de la fractura, κ_f la permeabilidad de la fractura, μ la viscosidad dinámica del fluido, df la apertura de la fractura y p la presión.

Para representar el aumento de la permeabilidad de las rocas, se define una permeabilidad secundaria a través de la aplicación de la ecuación de la ley cúbica (ecuación 3), la cual describe la permeabilidad de la fractura según la cantidad de fracturas (m) en un largo (L) y la apertura. Por simplicidad, no se considera la rugosidad para caracterizar las fracturas (Gudmundsson, 2011). Además, se presenta la proporcionalidad entre la permeabilidad secundaria y la conductividad hidráulica (K_f).

$$\kappa_f = m df^3/12L; K_f = (\rho g/\mu) \kappa_f \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$q_f = -(m df^3/12L\mu) \nabla T_p \quad (\text{Ecuación 4})$$

2.2 Definición térmica

Para modelar la transferencia de calor se utiliza la ecuación de transferencia de calor para medios porosos, la cual se deriva de las ecuaciones de transferencia de calor para sólidos (ecuación 5) y para fluidos (ecuación 6).

$$\rho_s C_{p,s} \partial T_s / \partial t + \nabla \cdot q_s = Q_s \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\rho_f C_{p,f} \partial T_f / \partial t + \rho_f C_{p,f} u_f \cdot \nabla T_f + \nabla \cdot q_f = Q_f \quad (\text{Ecuación 6})$$

Aplicando mixture rule se multiplica la ecuación 6 por la fracción del volumen del sólido θ_p , se multiplica la ecuación 7 por la porosidad $1-\theta_p$ y se suma el resultado de ambas. Además, la hipótesis del equilibrio térmico local asume que el fluido y el sólido poseen la misma temperatura (COMSOL, 2020).

$$T_f = T_s = T$$

Para el caso de las fallas y lineamientos principales se utiliza la interfaz Heat Transfer in Thin Structures, la cual considera un aumento en la velocidad del fluido producto de las fracturas y con ello un aumento en el transporte de calor, esto se observa en las ecuaciones 7 y 8.

$$dfr(\rho C_p)_{eff} \partial T / \partial t + dfr \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q_{fr} = dfr Q + q_0 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$q_{fr} = -dfr k_{eff} \nabla T \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde $(\rho C_p)_{eff}$ es la capacidad térmica efectiva a presión constante del volumen fractura-fluido, ρ la densidad del fluido, dfr la apertura de la fractura, C_p la capacidad térmica del fluido a presión constante, q_{fr} la conductividad térmica del flujo en el volumen fractura-fluido, k_{eff} la conductividad térmica efectiva de la mezcla fluido-fractura y Q es la fuente de calor.

En este trabajo se realiza un modelo en 2D del SGNCh hasta los 3 km de profundidad, con un perfil de orientación NE-SW. Este perfil tiene una extensión de 6.6 km en estado natural no perturbado y se realiza una evaluación del comportamiento en un horizonte de 30 años. La extensión de 6.6 km permite abordar el área entre los lineamientos regionales de orientación NW definidos (Morata et al., 2023), la cual tiene un ancho de 3.6 km. Además, se agregan 1.5 km en cada extremo para lograr que los efectos de las condiciones de borde del modelo se disipen lo suficiente de modo de obtener resultados más precisos.

2.3 Condiciones geológicas del caso de estudio

A) Definición de unidades geológicas y permeabilidad

Con los resultados del sondaje Nieblas-1 (Morata et al., 2023) se puede inferir algunas condiciones de borde para el modelo de este estudio e identificar la estratificación de la zona en el primer kilómetro de profundidad.

Litológicamente, el perfil para el modelo 2D contempla en los primeros 1.000 m de profundidad las lavas de la Formación Curamallín, luego 100 m de la unidad Hornfels y finalmente la unidad de Granito, la cual es proyectada hasta los 3 km de profundidad. Además, se considera la intersección con una falla inversa de bajo ángulo (de rumbo aproximado NS) y con dos lineamientos subverticales de dirección NW observados en terreno, los cuales corresponden a lineamientos regionales y están cercanos a los límites de la zona conductiva mostrados por los resultados del estudio magnetotelúrico de ENG (2007).

Las propiedades físicas de cada unidad de roca que se utilizan en la modelación numérica se presentan en la tabla 1. Estas propiedades son obtenidas de la literatura, a la espera de los datos medidos en esta investigación.

B) Conductividad hidráulica y conductividad térmica

En términos hidráulicos, se considera el medio completamente saturado hasta el nivel freático. En el caso de la transferencia de calor en el medio, se consideran mediciones de temperatura en superficie realizadas en esta investigación y en profundidad de estudios previos (López-Contreras et al., 2023; Morata et al., 2023).

Tabla 1: Propiedades físicas por litología utilizadas en el modelo (ENG, 2007; de Vallejo, 2002; Robertson, 1988).

Unidad	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	Conductividad térmica (W/mK)
Fm. Curamallín	2.59	3.81	2.25
Hornfels	2.60	1.50	3.50
Granito	2.70	1.50	3.20

En base a estos estudios, se infiere una condición de borde en el límite inferior de 300°C a los 3 km de profundidad entre los lineamientos dado el gradiente geotermal de 125°C/km en la zona conductiva y de aproximadamente 30°C/km en la zona convectiva (ENG, 2007; Vargas et al., 2022). En los puntos de la superficie donde se evidencia la falla inversa se utilizan los datos de mediciones en superficie de las fumarolas, la cual corresponde a una temperatura de 94°C (López-Contreras et al., 2023).

La tabla 2 muestra la conductividad hidráulica intrínseca (m/s) y con fracturas para cada unidad. En el caso de las unidades Hornfels y Granito, se diferencian dos conductividades hidráulicas secundarias según el nivel de fracturamiento, donde $k'' > k'$. Estos atributos también se pueden observar en la figura 1.

Tabla 2: Conductividad hidráulica intrínseca y fracturada para las unidades geológicas simplificadas del SGNCh (Earle, 2019; de Vallejo, 2002).

Unidad	k	k'	k''
Fm. Curamallín	10 ⁻⁹	10 ⁻³	-
Hornfels y Granito	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴

3. Resultados

Incorporando las condiciones de borde mencionadas anteriormente se puede obtener un modelo preliminar, el cual se presenta en la Figura 1. En este modelo se observa un desvío de la isoterma, las cuales se encuentran controladas por la geología estructural de la zona, específicamente por los lineamientos subverticales y la falla inversa presente en el sector. Además, los lineamientos restringen el reservorio que tendría una extensión de aproximadamente 3,6 km en la unidad granito según las observaciones en terreno e imágenes satelitales. Además, preliminarmente se observa en las simulaciones que algunos de los parámetros principales que controlan el ascenso de fluido son la porosidad y la densidad de fracturas.

4. Discusión y conclusiones

El modelo presentado se basa en que la principal forma de transporte de calor en la zona altamente fracturada, donde se encuentra el hornfels y granito, es a través de convección. Sin embargo, en la zona superior (primeros 1.000 m) es por conducción. De este modo, a estas profundidades se considera que existiría un gradiente geotermal de aproximadamente 30°C/km, valor común en los reservorios geotermales (Vargas et al., 2022). Además, cuando el fluido se encuentra en un medio altamente fracturado, las fracturas facilitarían la circulación del fluido y con ello el transporte de calor hacia la superficie. Así, las isotermas del modelo no están controladas sólo por la litología, sino también, y en mayor grado, por la falla inversa y los lineamientos regionales presentes. La ubicación de un reservorio profundo en la roca granítica estaría potencialmente condicionada por la reactividad de la secuencia volcano-sedimentaria a formar arcillas y zeolitas durante la interacción con los fluidos geotermales actuando como barrera para la circulación actual de fluidos calientes, lo que permitiría conformar una capa sello para el sistema (Morata et al., 2023). Respecto a la asignación de distintas permeabilidades en cada zona, es importante considerar estas variaciones debido al importante nivel de fracturas que se observan en cada unidad en la superficie.

Según los estudios previos ya mencionados, se estima que el SGNCh, en profundidad, sería un recurso de tipo líquido-dominado con una temperatura de 216-250°C y con una composición de pH más neutra. Estas condiciones sugerirían que el sistema hidrotermal de agua caliente es capaz de generar vapor que se puede aprovechar para generar electricidad. Las manifestaciones hidrotermales ácidas observadas en superficie estarían relacionadas con procesos dominados por vapor calentado al interactuar con el nivel freático.

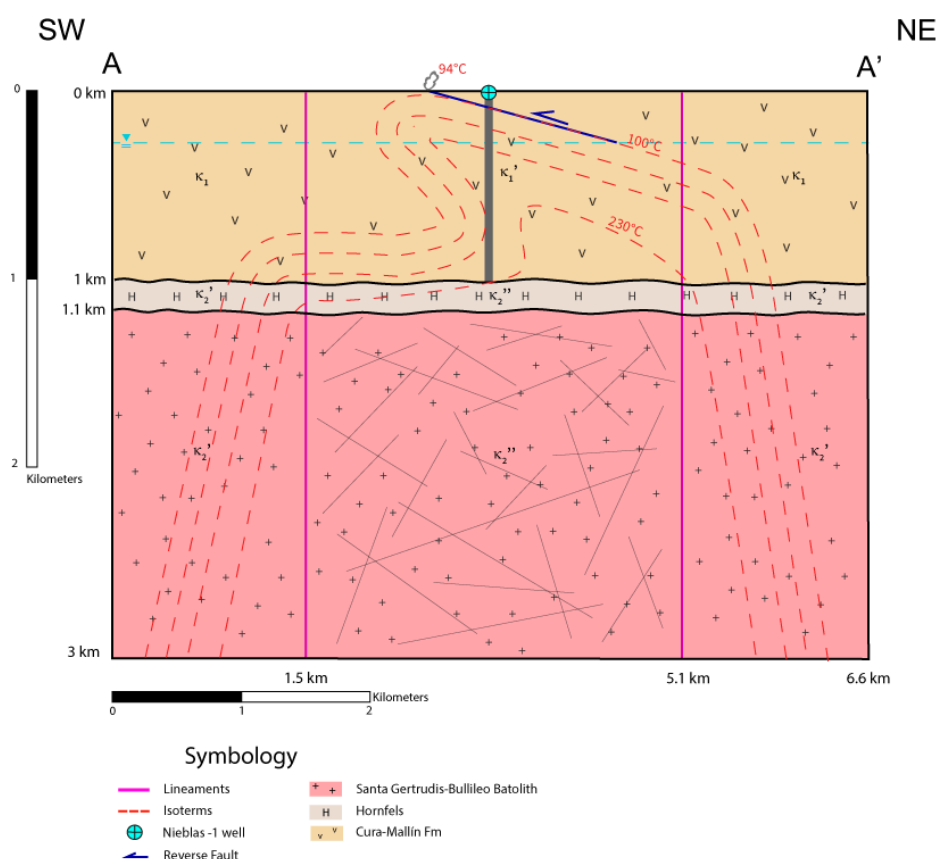


Figura 1: Modelo preliminar propuesto para el SGNCh en un perfil 2D de dirección NE-SW. En naranja se presenta la unidad Formación Curamallín, en gris la unidad Hornfels y en rosado la unidad Granito Santa Gertrudis. A 1,5 km y 5,1 km en la horizontal se presentan la intersección de los lineamientos subverticales regionales NW que definen el límite de la diferencia de permeabilidad estructural en cada unidad.

Finalmente, los datos de terreno como mapas, mediciones de temperatura, análisis químicos o mediciones de fracturas son capaces de proporcionar la información necesaria para entregar las restricciones a un modelo numérico. Al tener datos específicos de la zona de estudio, el modelo puede tener una mayor precisión, ya que se puede realizar una mejor calibración. Con esta información es posible extrapolar la metodología utilizada a otros sistemas geotermales de Chile y el mundo en los cuales se conozca la geología de la zona y se tenga información de al menos un pozo.

Palabras Clave: sistema geotermal, modelo hidro-térmico, Comsol Multiphysics, permeabilidad.

Financiamiento: Este trabajo es una contribución al proyecto ANID-FONDECYT #1220729 y al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA, ANID-FONDAP ACE210005).

Agradecimientos: Agradecimientos al apoyo del proyecto ANID-FONDECYT #1220729 y al CEGA. Los autores agradecen a Gianni Volpi y Germain Rivera (Enel Green Power) el acceso al sondaje exploratorio Nieblas-1.

References:

- COMSOL. (2020). Subsurface Flow Module User's Guide. Recuperado de: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.ssf/SubsurfaceFlowModuleUsersGuide.pdf>.
- de Vallejo, G., & Ferrer, L. I. (2002). Ingeniería Geológica.
- Earle, S. (2019). 14. Groundwater. Physical Geology-2nd Edition.
- ENG. (2007). Estudio de impacto ambiental: Exploración geotérmica profunda Nevados de Chillán, Technical Report Empresa Nacional de Geotermia.
- Franco, A., & Vaccaro, M. (2014). Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 987-1002.
- Gallardo, R. C. (2020). Evolución hidrotermal del sistema geotermal Nevados de Chillán. Tesis de Magister. Departamento de Geología. Universidad de Chile. 89 páginas.
- Gudmundsson, A. (2011). Rock fractures in geological processes. Cambridge University Press.
- Kaya, E., Zarrouk, S. J., & O'Sullivan, M. J. (2011). Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. Renewable and sustainable energy reviews, 15(1), 47-68.
- López-Contreras, C., Arancibia, G., Mura, V., Maza, S., Morata D., Browning, J., Healy D., Robidou, P. (2023). Control estructural de la distribución de temperatura en superficie del Sistema Geotermal Nevados de Chillán. Enviado a Congreso Geológico Chileno 2023, noviembre, Chile.
- Morata, D., Gallardo, R., Maza, S., Arancibia, G., Lopez-Contreras, C., Mura, V., Cannatelli, C. & Reich, M. (2023). Hydrothermal alteration in the Nevados de Chillán Geothermal System, Southern Andes: an approach to a fractured reservoir. Minerals, 13, 722.
- Robertson, E. C. (1988). Thermal properties of rocks. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/of/1988/0441/report.pdf>.
- Rybach, L., & Mongillo, M. (2006). Geothermal sustainability-a review with identified research needs. GRC Transactions, 30, 1083-1090.
- Vargas, L., Haas, J., Reyes, L., Salinas, F., & Morata, D. (2022). Generación de energía eléctrica con fuentes renovables. Editorial Universitaria de Chile.

Control estructural en la distribución de temperatura en superficie del Sistema Geotermal Nevados de Chillán

Camila López-Contreras¹⁻², Gloria Arancibia¹⁻²⁻³, Valentina Mura¹⁻², Santiago Maza²⁻⁴, Diego Morata²⁻⁴, John Browning¹, David Healy⁵, Phillipe Robidoux²⁻⁴

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Investigación de Materiales Avanzados y Nanotecnología (CIEN-UC), Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(5) University of Aberdeen, School of Geosciences, Aberdeen, UK.

I. Introducción

En la actualidad está ocurriendo un calentamiento global acelerado, con efectos ambientales negativos que hacen fundamental reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Para ello, la transición desde la explotación de recursos no renovables a recursos renovables es urgente. La energía geotérmica es un recurso continuo, autónomo y renovable que es clave para esta transición. Por esta razón es fundamental avanzar en el entendimiento de sistemas geotermiales y la comprensión del flujo de fluidos en las rocas de la corteza influye directamente en la aparición y explotación de los recursos geotérmicos.

Los sistemas geotermiales suelen exhibir diversas manifestaciones en superficie, ya sea suelos calentados por vapor, piscinas de barro, fumarolas, alteración hidrotermal, entre otras. Estas manifestaciones en superficie son producto de la circulación de fluidos y vapor que pueden alcanzar altas temperaturas y ha sido documentado, en muchos casos, que su ascenso se ve favorecido por la permeabilidad secundaria, es decir, la presencia de fallas y fracturas (e.g. Henley & Ellis, 1983). Este trabajo busca avanzar en cuanto al entendimiento del flujo de fluidos termales a través de fallas y fracturas, en una zona con intensa alteración hidrotermal en superficie, que se ha documentado como evidencia del sistema geotermal en profundidad.

El caso de estudio es el Sistema Geotermal Nevados de Chillán (SGNCh), sistema que se encuentra hospedado en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), en la cordillera andina de la Región del Ñuble. El CVNCh es considerado un estratovolcán activo de la Zona Volcánica Sur de los Andes Centrales y está compuesto de dos edificios volcánicos adyacentes, Las Termas y Cerro Blanco (Dixon et al., 1999, Naranjo et al., 2008). Se ha propuesto que el emplazamiento del CVNCh se encuentra controlado por fracturas de orientación NW-SE, activas durante el Holoceno, albergando 24 centros eruptivos (Cardona et al., 2021). Estos centros eruptivos son los responsables de las unidades geológicas más recientes presentes en la región, correspondientes a extensas zonas de lavas, brechas volcánicas y rocas piroclásticas (Naranjo et al., 2008).

El SGNCh cuenta con 2 reservorios, uno aproximadamente a los 250 m de profundidad con temperaturas entre 160°C y 174°C (Morata et al., 2023) y otro a mayor profundidad con temperaturas de 220°C a 250°C, a aproximadamente 1,1 km de profundidad (ENG, 2007). Además, este sistema presenta diversas evidencias en superficie en los sectores de Las Termas-Olla de Mote y Aguas Calientes, como los sus extensas áreas de alteración hidrotermal, surgencias termales, piscinas de barro, fumarolas y suelos calentados con temperaturas que alcanzan los 94°C (Morata et al., 2023).

Este trabajo se centra en el sector de Las Termas-Olla de Mote ubicado en el sector suroeste del CVNCh, donde dominan los lineamientos de dirección NE, marcados por contactos geológicos y/o fallas subverticales de rumbo N50E. Además, se han identificado fracturas de fuerte buzamiento con orientación preferente N20-50W y N70-90W. Asimismo, se ha observado una serie de fallas inversas de bajo ángulo subparalelas a la estratificación de la Formación Cura-Mallín (Morata et al., 2023).

II. Metodología

Los datos de distribución espacial en superficie de datos estructurales, temperaturas y presencia de lagunas burbujeantes, suelos calentados, fumarolas, vent, piscinas de barro y volcán de barro fueron obtenidos con el mapeo durante el trabajo de terreno (23 días en total), en un área aproximada de 1 km² (Figura 1).

El mapeo de temperatura se realizó utilizando una termocupla Hanna HI 98509 (precisión de $\pm 0,3^\circ\text{C}$) y cámara infrarojo Fluke TiS45 de enfoque manual, con medición de temperatura de -20°C a 350°C con una resolución de 160x120 (19.200 pixeles). Se midieron un total de 171 puntos de temperatura, para los cuales en cada medición se realizó a una profundidad de aproximadamente 15 cm para determinar datos de temperatura lo menos influenciados posible por las condiciones ambientales. La interpolación de temperatura se obtuvo mediante el software Arcgis con la herramienta ponderación de distancia inversa (IDW, según sus siglas en inglés) con un tamaño de celda de salida de 1 m.

Además, para contar con una imagen satelital y ráster de mejor resolución, se realizaron vuelos de dron mediante el vehículo aéreo no tripulado ligero de motor Mavic Air 2, que cuenta con una cámara ISO 110 de distancia focal de 4 mm, tiempo de exposición 1/320s y color RGB (fabricación de DJI Innovations: <http://www.dji.com>) cubriendo la misma área. Se realizaron un total de 12 vuelos a una altura sobre la superficie de 50 a 200 m con condiciones meteorológicas de cielo despejado y viento débil (<30 km/h). Cada vuelo, de 30 minutos de duración, consideró el uso de una batería de dron de 11,55 Ah. Se realizaron un total de 6 vuelos por día y cada día se registraron puntos de control terrestre (GCP). Finalmente, se procesaron 30 imágenes mediante el software *Structure from Motion* (SfM) Pix4UAV lo que generó un mosaico de resolución espacial de 0.09 m.

III. Resultados

En el área de estudio afloran lavas andesíticas, riolíticas y brechas volcánicas las cuales muestran una mineralogía primaria de cuarzo, plagioclasa y anfíbol parcialmente alterada a clorita, mica blanca y, en algunas ocasiones, ópalo y laumontita. Las manifestaciones geotermales identificadas corresponden a: 1) fumarolas, cuyas emanaciones de vapor se localizan en pequeños conductos (2-5 cm de diámetro) con temperaturas de 95°C, que generan precipitados y alteraciones de la roca caja y desarrollan *vent* que alcanzan un tamaño de hasta 3 m de diámetro; 2) piscinas burbujeantes de hasta 40 cm de diámetro, donde descargas de agua caliente alcanzan temperaturas entre 74-94°C; 3) piscinas de barro que alcanzan un tamaño de 1 a 2 metros de diámetro y temperatura de 94°C; éstas presentan arcillas de color gris mezcladas con descargas de agua, que interaccionan con los sedimentos y lo transportan desde la zona vadosa hacia la superficie; 4) suelos calentados, que presentan un mayor desarrollo espacial alcanzando dimensiones de decenas de metros y tienen temperaturas que varían entre 34-94°C (Figura 1a y 1b).

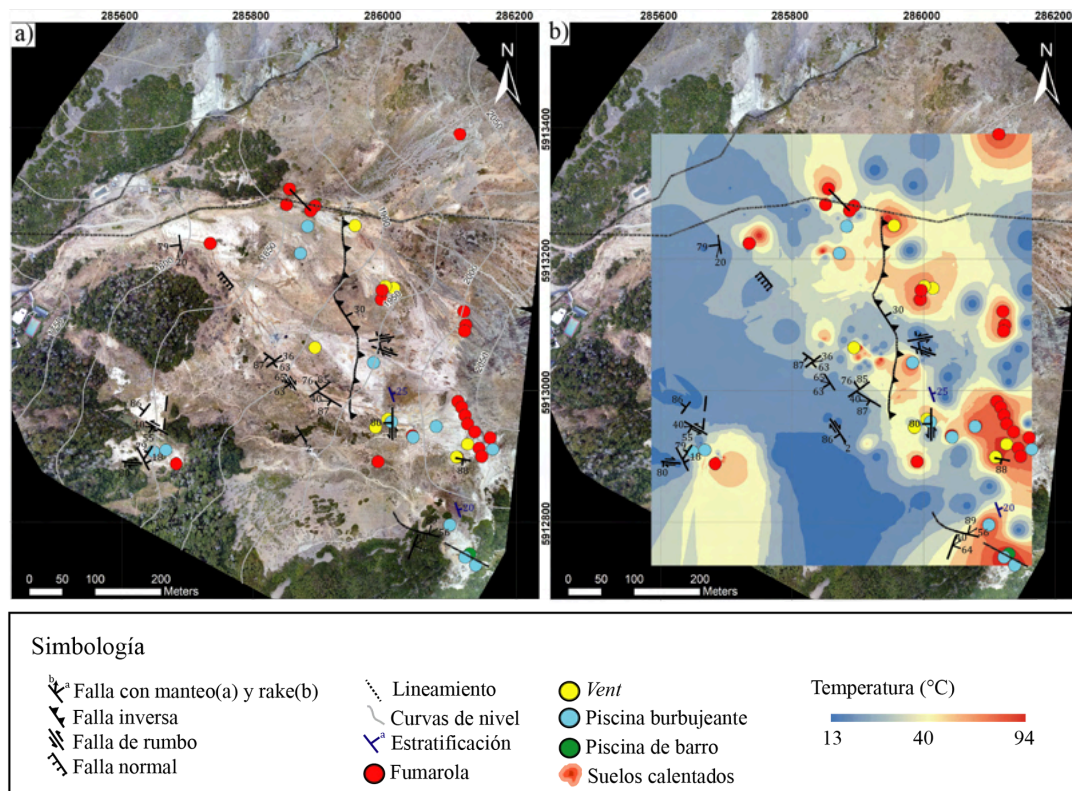


Figura 1: Mapa simplificado con las fallas medidas de la zona y la distribución de temperatura en superficie. a) Zona de estudio con la ubicación de piscinas burbujeantes, piscinas de barro, fumarolas, vent, y suelos calentados. b) Distribución de temperatura en la zona de estudio mediante interpolación IDW.

A escala regional se han identificado las siguientes familias de fallas: 1. Fallas con dirección E-W y WNW subverticales, de cinemática sinistral con componente normal; 2. Fallas de dirección N30-70E subverticales, de cinemática dextral; 3. Fallas con dirección NS a NNE inversas dextrales; 4. Fallas con dirección NW inversas (Morata et al., 2023).

El nivel regional se ve reflejado en el nivel local, pero en distinta abundancia. Localmente, se midieron un total de 36 planos de fallas con dirección principal NNE (N0-20E, 11 fallas), WNW (N50-80W, 15 fallas), NE (N55-60E, 3 fallas), NNW (N10-25W, 2 fallas) y otras 5 que no se encuentran en estos grupos. Estos planos de fallas observados corresponden a planos identificados por la presencia de estrías e indicadores cinemáticos (6 fallas), planos solo con estrías sin posibilidad de determinar sentido de movimiento (9 fallas) y planos que fueron identificados como fallas por presentar una separación relativa (21 fallas).

En relación a la distribución de temperatura en superficie, las isotermas de mayores valores (95°C), normalmente se encuentran localizadas en las fumarolas o piscinas burbujeantes y se distribuyen según la dirección N50-70W y ~NNW (Figura 1b). También queda de manifiesto que el desarrollo de los suelos calentados distribuye las isotermas de 35 y 95°C en una marcada orientación N50-70W y ~NNW.

IV. Discusión y conclusiones

El ascenso de fluidos hidrotermales a superficie puede ser conducido por permeabilidad primaria (porosidad y permeabilidad propia de la roca) y secundaria (fallas y fracturas) (e.g. Henley & Ellis, 1983). Los resultados aquí expuestos permiten sugerir ambos tipos de vías de ascenso de fluidos a la superficie, con una diferente tasa de transporte de fluidos.

En primer lugar, tanto los suelos calentados como las fumarolas son el resultado de la interacción de los fluidos geotermales con el nivel freático, lo que permiten la separación entre fluidos y vapor calentado que asciende por la permeabilidad primaria y secundaria, respectivamente, hacia la superficie. Sin embargo, los valores más altos de temperatura se encuentran en fumarolas, piscinas de barro y piscinas burbujeantes, lo que sugiere que el control estructural, es decir, la permeabilidad secundaria tiene preponderancia sobre la permeabilidad primaria de la roca en la tasa de ascenso de los fluidos y, por consiguiente, controla la alta temperatura en superficie.

Los puntos de alta temperatura alineados en dirección ~NNW se encuentran en la traza de una falla inversa de bajo ángulo, cuyo importante rol en el ascenso de fluidos hidrotermales ha sido previamente propuesto (Morata et al., 2023). Asimismo, el segundo grupo de puntos de alta temperatura también se alinean con un conjunto de fallas de orientación NW (Figura 1b). Por el contrario, las fallas de orientación NE, no parecen tener una relación espacial directa con los puntos de alta temperatura.

Por esta razón, se propone que la circulación de fluidos en el SGNCh se encuentra principalmente controlada por la permeabilidad secundaria y, en menor medida, por la permeabilidad primaria. En particular, se postula que serían las fallas de orientación NW subverticales y las fallas inversas de bajo ángulo con rumbo NNW son las que controlarían la circulación de fluidos en la zona.

Cabe destacar también que las fallas identificadas a la escala del mapeo coinciden en orientación con los principales lineamientos a nivel regional, particularmente el alineamiento NW de los subcomplejos Las Termas y Cerro Blanco del CVNCh. En este trabajo se visualiza cómo los valores de alta temperatura se concentran en la intersección de fallas NW subverticales y fallas inversas de bajo ángulo NNW, cumpliendo el rol de formar conductos que permiten el ascenso de una mayor tasa de fluidos. Es posible que la intersección entre estas fallas genere las condiciones favorables de permeabilidad para el ascenso, circulación y almacenamiento de los fluidos geotermales, como lo sugieren varios ejemplos mundiales (e.g. Craw, 2000).

En particular, en este sector de los Andes del Sur, varios autores (e.g. Sánchez et al., 2013; Cardona et al., 2021) han propuesto la posible relación de los lineamientos regionales NW con las fallas transversales a Los Andes (ATF, por sus siglas en inglés), los que constituirían reservorios magmáticos y de fluido hidrotermal. En ese contexto, este estudio podría ser una evidencia más del control estructural para el ascenso de fluidos hidrotermales en la zona de estudio y su relevancia para el emplazamiento del CVNCh y la formación y evolución del SGNCh.

Palabras Clave: Control estructural, Sistema geotermal, Circulación de fluidos

Financiamiento: Este resumen fue posible gracias al financiamiento de los proyectos FONDECYT 1220729 (Gloria Arancibia) y FONDECYT 11190846 (Philippe Robidoux) y es una contribución al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), ANID-FONDAP Project ACE210005.

Referencias:

- Cardona, C., Gil-Cruz, F., Franco-Marín, L., San Martín, J., Valderrama, O., Lazo, J., Cartes, C., Morales, S., Hernández, E., Quijada, J., Pinto, C., Vidal, M., Bravo, C., Pedreros, G., Contreras, M., Figueroa, M., Córdova, L., Mardones, C., Alarcón, A., Velásquez, G. y Bucarey, C. (2021). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex – Chilean Andes (2012 to 2020). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 420, 107409.
- Craw, D. (2000). Fluid flow at fault intersections in an active oblique collision zone, Southern Alps, New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 69, 523-526.
- Dixon, H.J., Murphy, M.D., Sparks, S.J., Chávez, R., Naranjo, J.A., Dunkley, P.N., Young, S.R., Gilbert, J. y Pringle, M.R. (1999). The geology of Nevados de Chillán volcano, Chile. *Rev. Geológica Chile*, 26(2), 227–253.
- ENG. (2007). Estudio de impacto ambiental: Exploración geotérmica profunda Nevados de Chillán sector Valle de las Nieblas. Technical Report Empresa Nacional de Geotermia S.A.
- Henley, R. W., & Ellis, A. J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth-science reviews*, 19(1), 1-50.
- Morata, D., Gallardo, R., Maza, S., Arancibia, G., López-Contreras, C., Mura, V., Cannatelli, C y Reich, M. (2023). Hydrothermal Alteration in the Nevados de Chillán Geothermal System, Southern Andes: Multidisciplinary Analysis of a Fractured Reservoir. *Minerals*, 13(6), 722.
- Naranjo, J.A., Gilbert, J. y Sparks, R.S. (2008). Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. *Cart. Geológica Chile Ser. Geol. Básica* 2008, 114, 32.
- Sánchez, P., Pérez-Flores, P., Arancibia, G., Cembrano, J. Reich, M. (2013). Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe–Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review*, 55(11), 1384-140.

Volcano scale characterization of rock physical properties at the Nevados de Chillán Geothermal System

Valentina Mura¹⁻², Gloria Arancibia¹⁻², John Browning¹⁻², David Healy⁴, Camila López Contreras¹⁻², Diego Morata²⁻³, Santiago Maza²⁻³, José Cembrano¹⁻², Thomas Mitchell⁵

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(2) Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) University of Aberdeen, School of Geosciences, Aberdeen, UK

(5) University College London, Department of Earth Sciences, London, UK

The Southern Volcanic Zone (SVZ) is an area with some of the largest geothermal potential in Chile (Aravena et al., 2016). The Nevados de Chillán Volcanic Complex (NChVC) is one volcano of the SVZ which hosts active geothermal systems. Geothermal systems are essentially large volumes of hot fluid trapped within the "void space" of rocks and they develop and grow as the fluids flow through the voids. The thermo-physical (hydraulic and mechanical) properties of the rocks interact and change as they interact with fluids passing through the volcanic system and during discrete events such as earthquakes and magma intrusion. Hydrothermal alteration can both increase or decrease variably the strength and permeability of host volcanic rocks (Farquharson et al., 2019; Heap et al., 2020; Heap et al., 2021a; 2021b), with changes dependent on the nature of rock type and alteration type. This suggests that to correctly characterize the geothermal system and fluid flow of a volcanic complex, targeted rock physical tests are needed for the rocks of the area and simulating natural P-T conditions. In this work we present data on the rock physical property characterization (porosity, P and S wave velocities, permeability, deformation moduli and strength) of the main units of the Nevados de Chillán volcanic complex.

Five blocks representative of the geothermal host reservoir and overlying strata were collected from the volcanic basement. Full block samples were taken oriented in the field using specimen orientation marks to record the strike and dip of bedding and/or a flat surface. Samples were re-positioned to match field orientations in the laboratory. The main geomechanical units of the geothermal system are granodiorites and diorites of the Santa Gertrudis Bullileo Batholith; andesites, tuffs and breccias of the Cura-Mallín Formation; andesites from Shangri-La lava flow; and hornfels which are a fine grained and silicified contact metamorphosed unit. Cylindrical core samples (25 mm diameter x 65 mm length) from each block were used to quantify density, porosity, and permeability; ultrasonic wave velocities; Unconfined Compressive Strength, indirect tensile strength and triaxial strength at different core orientations. Samples were subjected to variable thermal treatment to represent differential temperatures within and around the reservoir. Polished thin sections were prepared from blocks in the same orientation as the cored direction and analyzed using scanning electron microscope. Preliminary results show that core samples from andesites of the Cura-Mallín formation span a range in total porosity from 0.6 % to 1.5% with a mean density of 2.6 g/cm³. The tuffs of the Cura-Mallín formation present a much larger range in porosity, between 0.7% to 13% with a mean density of 2.4 g/cm³. Whilst not yet tested, we expect porosity values for crystalline rocks like granodiorites, diorites and hornfels to be lower and of a smaller range than the others. Related to microstructural observations, crystalline rocks like granodiorites, diorites and hornfels have a very low porosity, mainly comprised only large transgranular and intergranular oriented tectonic fractures with very high aspect ratio, straight forms, were often commonly oriented and anisotropic. In contrast, in andesites, tuffs and breccias the porosity is higher than crystalline rocks and is mainly composed of intergranular and intergranular pores with low aspect ratios and were relatively isotropic, but also have intergranular and transgranular tectonic fractures which contributed little to pore area. It is possible to identify porosity changes by mechanical deformation, with fracturing (tensile and shear) being the main deformation mechanism observed.

Volcanoes and geothermal systems are commonly heterogeneous over multiple scales. In this study, we investigate and quantify the influence of rock physical property heterogeneity, internally in the same rock types and across at least five different rock types that make up the complex and which host the geothermal system. By combining this information with field scale data on macro-structures it is possible to determine the key controls on fluid migration, both in the past and present, and during discrete or long-term stress states.

Keywords: Physical properties, Nevados de Chillán Geothermal System, Permeability, Porosity, Strength

Financing: This work is a contribution to the ANID-FONDECYT Projects 1220729 & 1210591 and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA) ANID-FONDAP Project ACE210005. Valentina Mura's PhD studies are funded by ANID - Beca Doctorado Nacional n° 21210890.

References:

- Aravena, D., Muñoz, M., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M.A., Dobson, P., 2016. Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile. *Geothermics*, 59, 1–13.
- Heap, M. J., Baumann, T. S., Rosas-Carbajal, M., Komorowski, J.-C., Gilg, H. A., Villeneuve, M., et al., 2021. Alteration-induced volcano instability at La Soufrière de Guadeloupe (Eastern Caribbean). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022514.
- Heap, M.J., Baumann, T.S., Rosas-Carbajal, M., Komorowski, J.C., Gilg, H.A., Villeneuve, M., Reuschle, T., 2021a. Alteration-Induced Volcano Instability at La Soufriere de Guadeloupe (Eastern Caribbean). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 126 (8) e2021JB022514.
- Heap, M.J., Baumann, T., Gilg, H.A., Kolzenburg, S., Ryan, A.G., Villeneuve, M., Clynnne, M.A., 2021b. Hydrothermal alteration can result in pore pressurization and volcano instability. *Geology* 49 (11), 1348–1352.
- Farquharson, J.I., Wild, B., Kushnir, A.R., Heap, M.J., Baud, P., Kennedy, B., 2019. Acid induced dissolution of andesite: evolution of permeability and strength. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 124 (1), 257–273.

Geoquímica, mineralogía y factores fisicoquímicos de la precipitación mineral en pozos y tuberías de la central geotérmica Cerro Pabellón

Maximiliano Seguel Cárdenas¹, Philippe Robidoux¹, Santiago Maza¹, Germain Rivera², Lorenzo Tempesti³, Verónica Rodríguez¹, Diego Morata¹

(1) Universidad de Chile y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla N°803, Santiago, Chile

(2) Enel Green Power Chile y Países Andinos, Santa Rosa N°76, Santiago, Chile

(3) Enel Green Power, Via A. Pisano N°120, Pisa, Italia

1. Introducción

La central geotérmica Cerro Pabellón (4500 m.s.n.m.) se encuentra en la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC) en el norte grande de Chile. En centrales de alta entalpía y de tipo binarias frecuentemente precipitan carbonatos, sílice y sulfuros, tanto en pozos como tuberías en superficie (e.g. Brown, 2013; Muller et al., 2015; Yildirim & Yildirim, 2015). Esto constituye el principal problema operacional de las centrales geotérmicas, debido a las pérdidas de eficiencia y costos en mantención. En el presente trabajo se presenta una mejor comprensión de los procesos de formación de los precipitados minerales, dada las condiciones existentes de circulación de fluidos en el sistema geotérmico de la central geotérmica Cerro Pabellón.

2. Marco Geológico

El campo geotérmico Cerro Pabellón está alojado en la Cadena Volcánica Cerro del Azufre – Cerro de Inacaliri (AIVC), que se extiende por unos 40 km, desde el volcán Cerro del Azufre (por el NW) hasta el volcán Cerro de Inacaliri (por el SE), como parte del arco volcánico del Cenozoico Superior de la Zona Volcánica Central (CVZ) de la Cordillera de Los Andes. Dentro del AIVC se reconocen estratovolcanes de composición andesítica-dacítica (Complejo Volcánico Apacheta-Aguilucho) y domos dacíticos (Domos Chac-Inca y Pabellón) (Godoy et al., 2017; Rivera et al., 2021; Taussi et al., 2019). Francis y Rundle (1976) reconocieron una depresión de graben que llamaron Graben Pabelloncito. Este se encuentra claramente expuesto desde el volcán Cerro del Azufre, al Noroeste, hasta el volcán Cerro de Inacaliri, al Sureste, y se manifiesta morfológicamente como un área localmente deprimida de unos 100 metros de altura, aproximadamente 20 km de largo y 3 km de ancho, entre dos fallas principales, dirección N53°W a N60°W. Giudetti & Tempesti (2021) presentan la primera data química de los fluidos geotérmicos de pozos de Cerro Pabellón, fluidos tipo clorurado sódico, ligeramente ácidos en condiciones de reservorio, con un TDS de 14-17 g/L. Químicamente, comparte características típicas de otros sistemas de la región: alto contenido de solutos enriquecidos en Ca, bajo contenido en álcalis y bajo contenido de gases. Giudetti & Tempesti (2021) y Morata et al (2019), sobre la base de datos geoquímicos, isótopos estables, ¹⁴C y ³H sugieren un sistema geotermal con un tiempo de residencia muy largo y una fuerte interacción con la roca huésped andesítica volcánica. El geotermómetro de cuarzo de respuesta rápida muestra temperaturas idénticas a las medidas en los pozos, mientras que el Na-K y el CO₂ de respuesta lenta indican una temperatura de equilibrio de 280°-290°C, por lo que presumiblemente el sistema es aún más caliente a mayor profundidad.

3. Metodología

Se realizaron muestreos de las fases sólidas, líquidas y gaseosas del *piping* de la central para estudiar la composición química de los fluidos geotérmicos y mineralogía de los precipitados. Se caracterizaron las condiciones fisicoquímicas de los fluidos geotermiales mediante muestreo y análisis químico de gases, vapor condensado y salmuera de producción en las líneas de pozos, líneas de vapor separado y líneas de salmuera separada de producción y reinyección. Así mismo, a través de los sensores instalados en la central, se obtuvieron datos de presión, temperatura y flujos máscicos al momento de los muestreos que fueron realizados durante el período 2021 a 2023. Por su parte, los precipitados minerales fueron muestreados en el pozo CP-6A, línea común salmuera de producción (mediante cupones de acero inoxidable), filtros y pasos de intercambiadores de calor (precalentador), línea de salmuera de reinyección y filtros de bombas de reinyección. Los métodos analíticos utilizados fueron difracción de rayos-X (D2-Phaser Bruker), fluorescencia de rayos-X (Shimadzu EDX-720), microscopio electrónico de barrido (FEI Quanta 250), cromatografía iónica (Thermo Scientific Dionex ICS-2100), espectrofotometría de absorción atómica (PerkinElmer PinAAcle 900F), espectrometría de masa cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión (Thermo iCAP Q) y cromatografía de gases (Agilent Technologies 7890A). Todos los equipos pertenecen al Departamento de Geología y CEGA de la Universidad de Chile.

4. Resultados

4.1. Geoquímica de fluidos y parámetros fisicoquímicos

Las muestras de gas están dominadas por CO₂, lo que representa al menos más del 97% del gas total en cada muestra según la titulación acidimétrica, mientras que los valores de H₂S varían entre un sitio al otro, en las líneas de vapor (1,88 - 0,33%) en comparación a los pozos (0,39 - 0,18%). Los valores de razón N₂/O₂ en general muestran poca contaminación atmosférica, con medianas de 1,3% de N₂ y 0,02% de O₂ en las líneas de vapor. Los otros gases más abundantes son Ar (0,04 - 0,004 %), He (25-9 ppm), CH₄ (26-7 ppm) y CO (6,9-2,4 ppm).

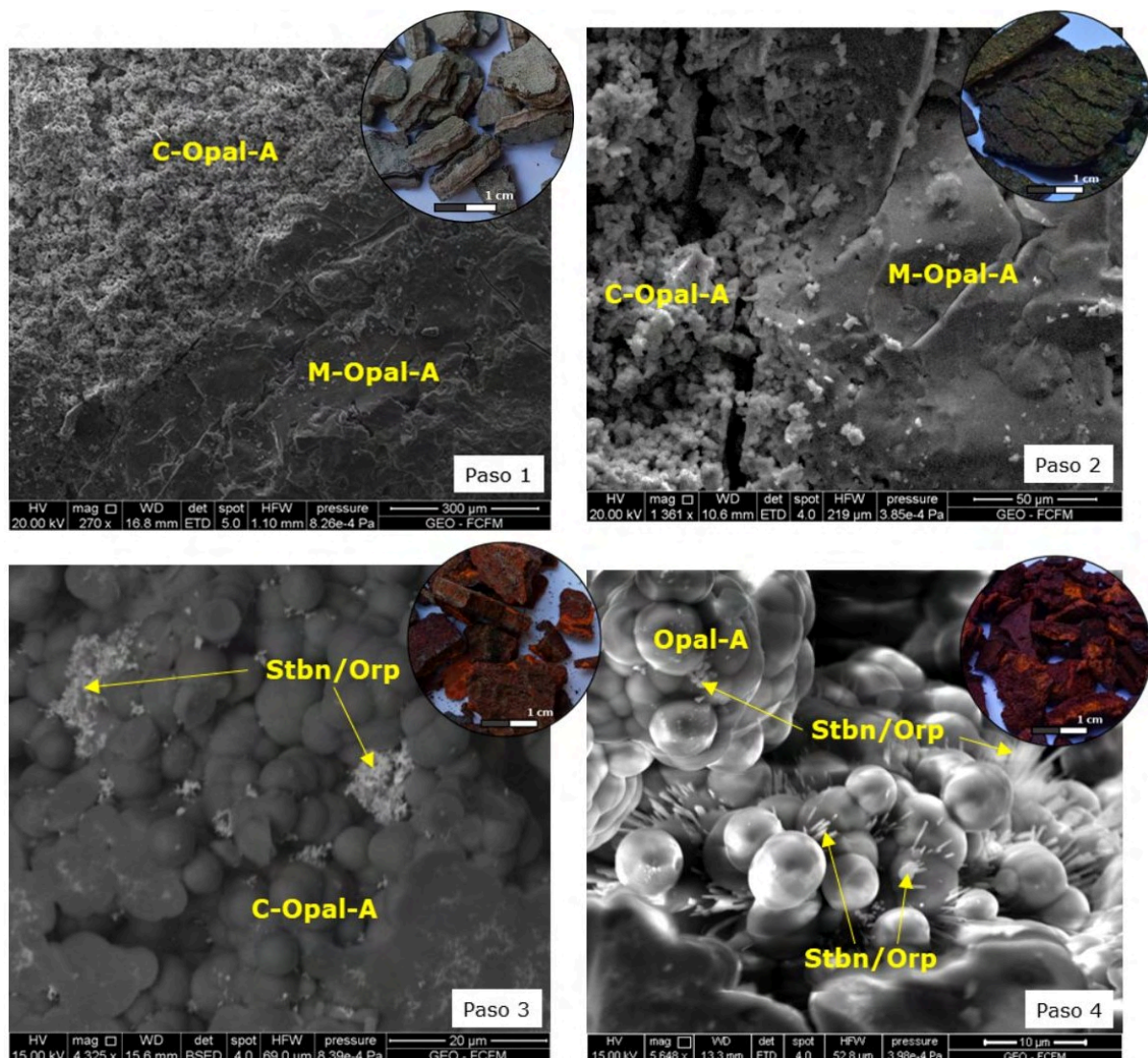
La geoquímica de salmuera de los pozos (157°C, 13-5 bar) y separadas (155°C, 7 bar, 500-300 t/h) muestran rangos de concentraciones de Na (8351 – 5144 mg/L), Si (945 – 317 mg/L), As (144 – 11 mg/L), Sb (11,85 – 1,85), Cl (14321 – 10012 mg/L), SO₄ (73 - 28 mg/L) y H₂S (52 – 27 mg/L).

El condensado de vapor de los pozos (157°C, 13-5 bar) y separados (155°C, 5 bar, 140 – 40 t/h) poseen rangos de Na (15,49 – 0,33 mg/L), Si (<0,01 mg/L), As (3,18 – 0,01 mg/L), Sb (0,07 – 0,01 mg/L), Cl (37 – 1.01 mg/L), SO₄ (4,54 – 0,04 mg/L) y H₂S (20 – 2,76 mg/L). Por su parte, la salmuera de reinyección (90°C, 5 bar, 1100 t/h) posee rangos de Na (5.635 – 3.483 mg/L), Si (805 – 291 mg/L), As (85 – 57 mg/L), Sb (3,27 – 0,01 mg/L), Cl (10.063 – 7.023 mg/L), SO₄ (29 – 19 mg/L) y H₂S (40 – 29 mg/L).

4.2. Mineralogía, química y texturas de precipitados

Las fases minerales reconocidas en el pozo CP-6A (WHP 13 bar, 157°C) fueron calcita, aragonito y siderita. En la línea de salmuera separada de producción antes del precalentador (155°C, 7 bar, 770 t/h) predominó la fase de ópalo-A. En los filtros de entrada del precalentador predomina el ópalo-A, seguido de hematita y esmectita. Al interior de los precalentadores, en los pasos 1 y 2 predomina nuevamente el ópalo-A junto a heulandita y esmectita. En los pasos 3 y 4, al interior de los precalentadores, se identificó ópalo-A, estibina, oropimente/getchellita, heulandita y esmectita. En la línea de salmuera de reinyección se reconoció principalmente estibina y oropimente/getchellita y en los filtros de bombas de reinyección se identificó ópalo-A, estibina y pirita.

Las imágenes SEM de los precipitados en los pozos de producción muestra que la calcita y aragonito precipitan de forma masiva y granular, mientras que siderita precipita con textura botroidal. A su vez, en las tuberías de la central, la sílice amorfa (ópalo-A) precipita en diferentes formas: i) una textura botroidal clásica y ii) una textura vítrea masiva y homogénea. En el primer caso se identifican esferas de escala micrométrica y aglomeraciones de estas, formando esferoides de mayor escala, dando un aspecto poroso en la imagen SEM (C-Opal-A). Esta morfología se ha observado en varios estudios de incrustaciones de sílice (Iler, 1979; Brown, 2013) y depósitos superficiales de sílice como en las zonas de alteración de Apacheta e Inacaliri (Maza et al., 2021a, b). Se sugiere que esta forma de ópalo se debe al predominio del mecanismo de precipitación coloidal. En el segundo caso, cuando la sílice genera una textura homogénea y masiva (M-Opal-A), se produce el depósito directo de sílice monomérica, que se debe a la precipitación de moléculas de Si(OH)₄ sobre superficies sólidas sin necesidad de formación de coloides. Esta precipitación generalmente da como resultado una capa de sílice vítrea densa y de alta dureza que es más difícil de eliminar (Brown, 2013).



Imágenes SEM de precipitados en el precalentador OEC2-CW. C-Opal-A: ópalo coloidal-A; M-Opal-A: ópalo-A masivo; Orp: oropimente; Stbn: estibina.

La estibina, que aparece en los pasos 3 y 4 del precalentador y en el cupón después de los precalentadores, precipita sobre la superficie de la sílice amorfa y entre los poros de estas partículas esféricas con hábito acicular. Además de las texturas aciculares bien definidas, la estibina también precipita en forma granular sobre algunas superficies. Posiblemente esta forma de precipitación corresponda a la metastibina, la forma amorfa de este mineral que macroscópicamente da a las muestras de escamas un color rojizo (Brown, 2011, 2013; Muller et al., 2015). Junto a los minerales de estibina se identificó oropimente y/o getchellita, debido a concentraciones de As en los minerales microcristalinos aciculares, aunque en bajas concentraciones.

Conclusión

Los cambios en las condiciones fisicoquímicas de los fluidos desde el reservorio geotérmico hasta la superficie inducen principalmente precipitación de calcita y aragonito masivo y siderita botroidal en los pozos de producción. Durante el ascenso del fluido por el pozo, disminuye la presión (170 bar a 7 bar) hasta que en el *flash point* se produce ebullición y migración de CO₂ disuelto hacia la fase vapor, favoreciendo la precipitación masiva de carbonatos en el *casing* del pozo (Allan et al. 2019; Yildirim & Yildirim, 2015). La mayor cantidad de precipitación mineral en superficie se reconoció dentro de los precalentadores, observándose una secuencia de precipitación dentro de estos, comenzando con gruesas capas de sílice amorfo (ópalo-A) masivo y botroidal, junto a zeolitas y arcillas granulares, seguido de estibina, oropimente/getchellita acicular y pirita microcristalina en los pasos finales de los precalentadores. La caída de temperatura (155°C a 90°C) de la salmuera concentrada luego de la separación con el vapor es el principal factor para la sobresaturación química y consecuente precipitación de estas fases. En la línea de reinyección el fluido enfriado (90°C, 5 bar) y levemente ácido (pH 5,6), debido a la mezcla con el condensado de vapor, posee condiciones favorables para la precipitación de sulfuros de Sb, As, Fe y metales pesados (Brown, 2011; Muller et al., 2015; Seguel et al, 2023; Wilson et al., 2007). Este trabajo ayuda a comprender los fenómenos de precipitación mineral a partir de fluidos hidrotermales/geotérmicos en condiciones conocidas (P-T-X) y también brinda información base para discutir estrategias de aprovechamiento económico de los minerales y de mitigación contra la incrustación dentro de las centrales geotérmicas.

Palabras Clave: Cerro Pabellón, Geotermia, Scaling, Geoquímica, Fluidos geotermiales.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) y se realizó en el marco del programa de cooperación científica entre Geotérmica del Norte (GDN) y el CEGA.

Referencias:

- Allan, G., Pogacnik, J., Siega, F., and Addison, S.J. (2019). Wellbore Simulation to Model Calcite Deposition on the Ngātamariki Geothermal Field, NZ.
- Brown, K. (2011). Antimony and Arsenic Sulfide Scaling in Geothermal Binary Plants.
- Brown, K. (2013). Mineral Scaling in Geothermal Power Production. ISBN 978-9979-68-337-7. ISSN 1670-7400.
- Giudetti, G., and Tempesti, L. (2021). First Geochemical Data from Cerro Pabellón Geothermal Project (Apacheta Region, Chile).
- Godoy, B., Rodríguez, I., Pizarro, M., Rivera, G. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.09.008>.
- Iler, R. K. (1979) The Chemistry of Silica.
- Maza, S.N.; Collo, G.; Morata, D.; Cufía-Rodríguez, C.; Taussi, M.; Renzulli, A. (2021b). <https://doi.org/10.3390/min11111279>.
- Maza, S.N.; Collo, G.; Morata, D.; Taussi, M.; Vidal, J.; Mattioli, M.; Renzulli, A. (2021a). Active and fossil hydrothermal zones of the Apacheta volcano: Insights for the Cerro Pabellón hidden geothermal system (Northern Chile).
- Morata, D.; Reich, M.; Daniele, L.; Rivera, G.; Volpi, G.; Cecioni, M.; Giudetti, G.; Cappetti, G. (2019). Origin and age of fluids at the Cerro Pabellón geothermal system, Chile.
- Muller, L., Gill, J. S., Rodman, D., Brown, K., & Robinson, R. (2015).
- Rivera, G., Morata, D., Ramírez, C., and Volpi G. (2021). Volcanic and Tectonic Evolution of Azufre – Inacaliri Volcanic Chain and Cerro Pabellón Geothermal Field (Northern Chile).
- Seguel, M., Rivera, G., Cecioni, M., Volpi, G., Tempesti, L., Giudetti, G., Maza, S., Morata, D. (2023). Geochemistry, mineralogy and geochemical model of scaling in Cerro Pabellón.
- Taussi, M., Godoy, B., Piscaglia, F., Morata, D., Agostini, S., Le Roux, P., Gonzalez-Maurél, O., Gallmeyer, G., Menzies, A., Renzulli, A. (2019).
- Wilson, N., Webster-Brown, J., & Brown, K. (2007). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.04.001>.
- Yildirim, N. & Yildirim, A. (2015).

Narrativas y desarrollos geotérmicos: una mirada comparada de Chile, Suecia y Turquía

Sofía Vargas Payera¹, Marco Billi³, Valentina Barrera², José Opazo⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA

(2) Universidad de Chile, Núcleo de Estudios Sistemáticos Transdisciplinarios (NEST-R3)

(3) Universidad de Chile, Departamento de Gestión e Innovación Rural (DGEIR) y Cr2

(4) Universidad Adolfo Ibáñez, Escuela de Negocios,

La energía geotérmica, que aprovecha del calor interno de la Tierra, es una de las formas de energía reconocida por el rol que puede tener en el contexto de la crisis climática. Descrita e instalada como una energía con un alto potencial, sobre todo en países como Chile favorecido por sus condiciones geológicas, se considera como una energía renovable, con un alto factor de planta por estar disponible 24/7 y de bajo impacto. Sin embargo, sus trayectorias y niveles de desarrollo han sido diversos, así como el nivel de aceptación social y apoyos desde las instituciones gubernamentales.

Para describir las distintas trayectorias y factores que interactúan con el desarrollo de esta energía, esta ponencia presenta una mirada comparada de tres casos: Suecia, Chile y Turquía los que destacan por diversos factores. Por ejemplo, en Suecia, a finales de 2018, el protagonismo ha estado asociado al uso directo. En este contexto, las bombas de calor geotérmicas proporcionaron 23 TWh de calefacción renovable procedente del suelo; Turquía, por otra parte, es un país que ha impulsado la geotermia y es reconocido por su dinamismo, debido al alto volumen de inversión e interés de privados; y por último en el caso de Chile, el uso de la geotermia es aún emergente, donde si bien se ubicó como el primer país de América del Sur en contar con una planta geotérmica (la más alta del mundo), no cuenta con nuevos desarrollos y no existe a la fecha marco legal para el desarrollo de geotermia somera y/o de baja entalpía.

En este marco, esta ponencia tiene por objeto reflexionar sobre las experiencias y condiciones descritas en estas distintas trayectorias de la energía geotérmica. Utilizando la aplicación de la metodología Q, esta presentación describe los puntos de vista y las percepciones de las partes interesadas de la industria, el mundo académico, las instituciones públicas y los miembros de la comunidad de los tres casos estudiados.

Si bien esta ponencia presenta una mirada comparada, se hará especial énfasis en el caso de Chile. El trabajo de campo en este país permitió realizar talleres con 21 representantes de distintos organismos y de la sociedad civil lo que permitió profundizar sobre los porqués de una trayectoria geotérmica en Chile marcada por el discurso académico, con altos y bajos en cuanto al apoyo gubernamental, así como interés de privados y un baja aceptación social.

Palabras Clave: geotermia, aspectos sociales.

Financiamiento: FORMAS (Swedish Research Council, Project no: 2020-00825) y Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA- FCFM.

Agradecimientos: A participantes y al Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA- FCFM.

Minerales de alteración hidrotermal del testigo Pozo Corazón, San Esteban, Chile

Constanza Velarde Acosta¹, Santiago Maza¹⁻², Matías Taucare¹⁻²⁻³, Dennise Toro¹⁻², Diego Morata¹⁻², Linda Daniele¹⁻²⁻³, Rafael Morales¹, Catalina Sanchez¹, Cristóbal Alonso¹

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

(3) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Las Termas El Corazón ubicado en la localidad de San Esteban (cuenca del Río Aconcagua, Región de Valparaíso), son manantiales termales de baja temperatura (20-24°C) que afloran a lo largo de la Zona de Falla Pocuro. Con el propósito de entender la circulación de agua subterránea en roca fracturada, este sector ha sido estudiado a detalle a partir de un enfoque multidisciplinario en superficie, que ha involucrado hidrogeoquímica, isótopos estables, geofísica, topología, y geología estructural (Taucare et al., 2020a, 2020b, 2022, Figueroa et al., 2021). A partir de dichos estudios, se determinó que la roca fracturada cumple un rol relevante en la renovación de agua subterránea de los acuíferos que actualmente nos abastecen de agua en Chile Central y, para poder estudiar directamente estos flujos, se perforó un pozo de 440 m de profundidad en diamantina. El proyecto Pozo Corazón fue realizado entre los meses de agosto y diciembre del año 2022. Al estudiar el testigo se observó la gran presencia de vetas hidrotermales que invitan a estudiar en detalle la mineralogía, al parecer, asociada a la paleocirculación de fluidos geotermiales. De esta forma, en este resumen se presentan los resultados preliminares de la identificación de la mineralogía de alteración utilizando difracción de rayos X.

Los resultados preliminares del testigo indican los primeros 164 m la roca de caja se compone principalmente de andesitas y tobas andesíticas. Luego, desde los 164 hasta los 215 m, se encuentran sedimentos semiconsolidados y desde los 215 – 450 m un intrusivo de composición granítica. Entre los 100 y 164 m de profundidad se identifican zonas altamente fracturadas con gran presencia de salbanda, correspondientes al núcleo de falla de la falla inversa San Francisco (perteneciente a la zona de Falla Pocuro; Taucare et al 2022). La mineralogía de alteración se identifica asociada a frecuentes vetas y roca de caja alterada. Los primeros 164 m consisten en plagioclasas albitizadas, asociadas a laumontita con una proporción variable entre 6 – 56%, cuarzo entre 3 – 21%; cloritas con un 4 – 21% y presencia de calcita de un 3 – 10%. En este tramo, se identifican diferentes familias de vetas rellenas de laumontita, cuarzo, calcita, hematita acompañada de yeso, pirita y clorita. Desde los 215 m a los 450 m se identifica una alta proporción de feldespato K y cuarzo y alta presencia de micas blancas (illita) en los minerales de alteración con una proporción variable entre 7 – 46% acompañadas en menor proporción por clorita entre un 3 – 9%; laumontita 3 – 13% y pirita entre 2 – 4%. La composición de vetas en este sector corresponde a cuarzo, feldespato K, micas blancas (illita) y hematita. Además, en algunos niveles se identificó arcillas esmectíticas (4 – 6%) con presencia de interestratificados I/S (illita/esmectita) y C/S (clorita/esmectita). También se identificaron varios niveles con abundante presencia óxidos de Fe.

Los resultados preliminares permiten proponer una intensa alteración hidrotermal de carácter propilitico en las rocas andesíticas y potásico-sericitica en las rocas graníticas, y donde la compleja red de vetas manifiesta la ocurrencia de más de un evento de fluidos termales superpuestos y temporalmente anteriores a las actuales. También puede identificarse un fuerte control estructural de la circulación de fluidos termales y una estrecha relación entre los minerales de alteración y la roca caja. Las asociaciones de cuarzo + laumontita + clorita + calcita en los primeros 164 m, indican un fuerte control litológico (andesita) en la mineralogía de alteración, interpretándose como el resultado de fluidos de pH neutro y cálcicos, con temperaturas cercanas a los 200 °C, correspondientes a una alteración propilitica. Por su parte, las altas proporciones de feldespato K en vetas y roca caja son indicadores de una alteración K, mientras que las altas proporciones de mica blanca + cuarzo + pirita + clorita estarían asociadas a una alteración sericitica superpuesta indicando para este tramo mayores temperaturas 250 – 350°C. El contacto entre estas litologías diferencialmente alteradas puede indicar que dentro de la Zona de Falla Pocuro había conductos favorables para la circulación de fluidos termales en la roca andesítica.

Palabras Clave: Alteración hidrotermal, sistema hidrotermal fósil, pozo profundo, arcillas, clorita.

Financiamiento: El financiamiento de la perforación del estudio fue proporcionado por Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través del Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007, y apoyado por el consorcio CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349 y el proyecto Anillos Temáticos no. ATE220029. Este trabajo es una contribución al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)

Referencias:

- Figueroa, R., Viguié, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment* 771, 145456. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>.
- Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez-Estay, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguié, B., Figueroa, R., Morata, D., Daniele, L., 2022. Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pocuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8°S). *Journal of South American Earth Sciences* 118, 103914. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103914>.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguié, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020a. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment* 722, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.
- Taucare, M., Viguié, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., Leonardi, V., 2020b. Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile). *Hydrogeology Journal* 28, 2429–2438. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02200-3>.

Geoquímica e hidroquímica de los sedimentos y aguas en el sistema hídrico de Alhué, posibles fenómenos asociado

Yerko Rodríguez Duran¹, **Felipe Araya Hinojosa¹**, Álvaro Antonio Navarrete Calvo²⁻³, Camilo Sánchez²⁻³

(1) Andres Bello, Geología, Ingeniería, República 237, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(3) Cobrizo, Geología Ambiental, Casa Matriz Linares, Región del Maule, Chile.

La industria minera es clave para el crecimiento económico de Chile, llegando a un 20% de los ingresos fiscales anuales. Sin embargo, las localidades donde son extraídos estos minerales suelen ser afectadas por estas actividades, producto de los residuos mineros resultantes, los que son almacenados en botaderos o relaves. Estos remanentes mineros al estar en contacto con el agua o aire pueden llegar a liberar contaminantes al ambiente, por medio de distintos procesos geoquímicos como por ejemplo el drenaje ácido. Por lo que es importante estudiar las localidades con presencia de residuos mineros como lo es la comuna de Alhué.

La comuna de Alhué se encuentra en el límite de la Región Metropolitana y la del Libertador Bernardo O'Higgins. Se caracteriza por ser una localidad rural con una fuerte impronta minera albergando distintas faenas de oro y plata desde hace décadas. El manejo de los desechos de estos procesos se hace a través de un botadero y un relave en pasta, ambos activos para la minería de oro y plata; además un relave resultante de la minería de cobre que se extrae a 80 km al este de la comuna. Estos remanentes mineros se encuentran interactuando por medio de la meteorización, disolución, infiltración y escurrimiento de los desechos hacia la subcuenca de Alhué, la que es conformada principalmente por los esteros Alhué y Carén.

El año 2006, se registró un derrame desde el embalse hacia las aguas del estero Carén, resultando en la contaminación por metales pesados como el Cr y Cu (CODELCO, 2006). También, en el 2015 los pobladores de Villa el Asiento y Villa Alhué realizaron una denuncia ciudadana a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), donde señalaban que existía contaminación por parte del botadero (SMA, 2015). A pesar de estos antecedentes, la definición de potenciales contaminantes originados por la reacción de los relaves y las distintas condiciones ambientales no ha sido estudiada ampliamente. Por lo que este estudio pretende evaluar el impacto que tienen los residuos mineros en el sistema hídrico y determinar las posibles variaciones geográficas entre las zonas pobladas e industriales.

Para ello se llevó a cabo la toma de muestras de diferentes puntos a lo largo de los esteros Alhué y Carén y su posterior confluencia. El análisis de las muestras de aguas se realizó con las técnicas de ICP-MS (espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo) e ICP-OES (espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo).

En los puntos de muestreo donde existe la influencia de los residuos mineros, se observa un aumento en las concentraciones de Mo, Ni y Se para las aguas superficiales con respecto a las normas de calidad de agua para riego y agua potable chilenas (NCh 1333 y NCh 409, respectivamente). Para los sedimentos existe concentraciones elevadas de Cu, Fe, Mg, S, Ca y K, respecto a la norma de MacDonald (2000) la que posee valores TEC (Threshold effect concentration) y PEC (Probable effect concentration), esta es una norma de calidad ambiental para sedimentos presentes en sistemas de agua dulces continentales.

Si comparamos la mineralogía presente en el distrito minero de Alhué con los resultados obtenidos de las aguas y sedimentos, podemos decir que existe una relación directa entre las altas concentraciones de elementos y compuestos correspondientes a los minerales de mena y ganga que se extraen en la zona de estudio: Al, S, Ca, Cu, Fe, Mg, K, Pb, Mo, Ni, SO₄. Existe una correlación entre estas grandes acumulaciones y los remanentes mineros que están en contacto directo con los esteros, ya que se observó un aumento en cada punto después de algún residuo minero. También se pudo determinar, mediante gráficos binarios la relación entre los elementos disueltos en el agua y los elementos presentes en los sedimentos, como, por ejemplo, la razón Ca/Mg aumenta en los sedimentos y disminuye su concentración disuelta en las aguas versus lo que sucede con la razón SO₄/HCO₃ que presenta un enriquecimiento en las concentraciones disueltas. La presencia de Se solo se puede asociar a los relaves aledaños.

Esto sugiere que existe un aporte en las concentraciones de los iones presentes tanto desde la interacción agua-roca como de los residuos mineros, por lo que se establece que los residuos no se encuentran estables químicamente y así, es posible proponer un continuo monitoreo y estudio de los procesos hidroquímicos en esta zona.

Palabras Clave: Hidroquímica, sedimentos.

Agradecimientos: Los autores reconocen el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio realizado.

Hydrogeochemical modeling of unsaturated tailings: unveiling enrichment processes and environmental implications for arid climates

Sebastián García¹, Erika González Díaz¹, Brian Townley¹, Manuel Caraballo Monge²

(1) Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

(2) University of Huelva, Department of Mining, Mechanic, Energetic and Construction Engineering, Avda. de las Fuerzas Armadas, S/N, Huelva, Spain

Mine tailings can be found in most mining districts around the World, being both a potential source of contaminants and also a potential secondary source of critical raw materials. An intensive and dense drilling campaign is considered an initial requirement to generate a confident and detailed geostatistical model of these potential secondary resources. However, these sampling and characterization campaigns are very costly in time and money. A faster and cheaper alternative could be the generation of a geochemical and mineralogical model of the deposit using a few drills (characterizing the tailings) to generate a reactive transport model to anticipate the existence of enriched or depleted zones for a mineral or element of economic interest. The current study generated a 2D reactive transport model of an IOCG-type mine tailings in an arid climate in northern Chile. The model is used to reproduce a previous detailed mineralogical and geochemical study (755 samples from a total of 32 boreholes made on tailing deposit with an area of 0.25 km² and a maximum depth close to 43 m) and an intricate geostatistical model (block size of 5 m × 5 m × 1 m, resulting in a total of 1,800,000 blocks). The reactive transport model is comprised by several components that include hydrodynamic parameters, such as permeability and porosity, as well as geochemical reactions and transport processes. Thanks to this complexity and multidisciplinary, it provides valuable insights for the operational management of this type of facilities, during both their active and close periods. At the same time, it is able to simulate the mineralogical evolution of these IOCG-type tailings deposits in an arid climate, reproducing the different depleted/enriched geochemical horizon observed in the field and predicting their small progress over a 50 year period. As a result, the proposed model serves as a powerful tool for understanding and predicting the complex mineralogical changes (through time and along a 2D space) within a tailing dam. Its applications extend beyond the specific case presented in this study, opening doors for further research and interdisciplinary collaborations in the fields of mining engineering, environmental science, and geochemistry.

Keywords: Reactive transport, Tailing, Unsaturated flow, Sulphide oxidation.

Financing: CORFO and Codelco through the project 16PTCEME-66524 and by the National Agency for Research and Development (ANID)/ Scholarship Program/ DOCTORADO BECAS CHILE/2019 -21192290 and FONDEQUIP EQM170141.

Acknowledgements: We thank Codelco Tech and Pucobre S.A for their technical assistance.

Caracterización Geoquímica y Mineralógica del sitio del tranque de relaves de Las Palmas mediante Microscopía Electrónica de Barrido con espectrómetro de energía dispersiva (SEM-EDS)

Sebastián García¹, Erika González Díaz¹, Brian Townley¹, Manuel Caraballo Monge²

(1) Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

(2) University of Huelva, Department of Mining, Mechanic, Energetic and Construction Engineering, Avda. de las Fuerzas Armadas, S/N, Huelva, Spain

En las últimas décadas, a pesar de los esfuerzos realizados en la caracterización geoquímica de relaves en Chile, aún es necesario realizar estudios mucho más detallados para comprender el impacto ambiental de estos pasivos mineros. En particular, los generados por el drenaje minero y el transporte de contaminantes en agua y sedimentos.

De acuerdo con estas necesidades, proponemos como primer acercamiento a un modelo geoquímico de dispersión de contaminantes el uso de microscopía electrónica de barrido con espectrómetro de energía dispersiva (SEM-EDS). Este instrumento sirve para reconocer y visualizar fases sólidas, entregando resultados cualitativos (morfología) y semicuantitativos (concentración de elementos).

El depósito de relaves Las Palmas, ubicado en Penciahue, Región del Maule, fue elegido como caso de estudio por ser un ejemplo emblemático de un desastre de contaminación ambiental generado por un pasivo abandonado. Durante el terremoto de 2010, la estructura del tranque colapsó vertiendo 100.000 m³ de material sobre 11 ha de campos agrícolas, obstruyendo el Estero Las Palmas (ELP).

Se tomaron muestras de sedimentos de relaves, suelos aledaños y depósitos fluviales. En los 3 tipos de sedimentos se reconocieron sulfuros de Fe, Pb y Zn, asociándolos a pirita (Py), galena (Gn) y esfalerita (Sp) por su química y morfología. La presencia de estos sulfuros primarios en los suelos circundantes y en los sedimentos del ELP se atribuye al derrame de material en 2010 y a su posterior transporte. Además, en las muestras de relave y del ELP también se detectaron sulfatos de Fe-K, los cuales se interpretaron como jarosita, mineral secundario comúnmente reconocido en ambientes de drenaje ácido de mina (DAM). A pesar de estas evidencias y de las condiciones favorables para la generación de DAM a partir de sulfuros meteorizados y sulfuros en los relaves, las aguas aledañas no muestran influencia de DAM. El vertido de relaves no modificó el pH circunneutral (6,6 promedio) y baja CE (382 µS/ cm) del ELP. Se espera que el estero tenga un alto contenido de alcalinidad que pueda neutralizar mediante mezcla el bajo flujo de aguas contaminadas.

Respecto al uso del SEM, el reconocimiento de metales como Cu, Fe, Pb y Zn en los sedimentos es coherente con estudios anteriores en la zona (concentración promedio en mg/kg de Cu: 705, Fe: 30.315, Pb: 4.216, Zn: 4.941 (CENMA, 2017)), que desarrollaron análisis geoquímicos más específicos (DRX, AAS). Esto demuestra que el uso de SEM puede ser una herramienta muy útil para colaborar en la caracterización geoquímica de áreas con relaves.

Finalmente, se concluye que 10 años después del colapso de los relaves, los suelos agrícolas y los sedimentos fluviales siguen contaminados, sin embargo, queda mucho por hacer para cuantificar la afectación en el área.

Palabras Clave: Drenaje ácido de mina, Metales, Relaves.

Agradecimientos: Los autores reconocen el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio realizado.

Referencias:

- CENMA. (2017). Estudio de Riesgo Ambiental Tranque de relaves Las Palmas, comuna de Penciahue, Región del Maule. Santiago de Chile.

Geoquímica ambiental del relave colapsado de Las Palmas, región del Maule: Impacto ambiental y posibles procesos hidrogeoquímicos

Fabián Muñoz Bastias¹, Álvaro Navarrete Calvo²⁻³, Camilo Sánchez Yáñez²⁻³

(1) Escuela de Geología, Universidad Andrés Bello

(2) Escuela de Geología, Universidad Mayor

(3) Cobrizo - Geología Ambiental, Linares, Región del Maule, Chile

La industria minera genera grandes cantidades de material residual, como botaderos o tanques de relave, que representan un grave problema ambiental debido a su abandono y el deterioro progresivo de sus condiciones físicas y químicas a lo largo del tiempo. En Chile, existen 173 relaves abandonados, siendo el caso del tranque de relave Las Palmas en la región del Maule uno de los más emblemáticos. Este depósito, abandonado desde 1999 y colapsado parcialmente en 2010 debido a un terremoto, ha esparcido sus residuos sobre una superficie de 10,9 ha, afectando suelos de residencias rurales y esteros superficiales. Los residuos de minería de oro presentes en este relave se caracterizan por contener sulfuros de hierro (pirita y calcopirita), plomo (galena) y zinc (esfalerita), así como concentraciones variables de cianuro y cadmio.

A pesar de más de una década desde el colapso, aún no se ha determinado con certeza el área afectada por el transporte de contaminantes ni su destino final. Tampoco se ha estudiado en detalle las concentraciones de contaminantes en las aguas, suelos y sedimentos cercanos, ni los procesos geoquímicos que determinan el comportamiento y el impacto ambiental del relave. Con el objetivo de abordar esta problemática, se realizaron muestreos de tres tipos de muestras: material de relave, sedimentos fluviales del estero adyacente de zonas posiblemente contaminadas y de zonas naturales y eflorescencias presentes en el relave.

El estudio consideró la toma de muestras de tres tipos: material de relave, sedimentos fluviales del estero Las Palmas, y muestra de material de eflorescencias presentes en el relave. Este muestreo se desarrolló los días 21 y 22 de septiembre del 2022. El estudio se llevó a cabo mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) para determinar la mineralogía, y análisis composicional mediante ICP-OES, previa digestión con agua regia. En la preparación de muestras, agradecemos y reconocemos el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio.

Los resultados obtenidos a través del análisis mineralógico revelaron la presencia de tres grupos principales de minerales: óxidos, sulfatos solubles y sulfatos no solubles. Se identificaron sulfatos como la jarosita y la beaverita en las muestras de relave, así como varios óxidos como goethita, massicot, zincita, cuprita y litargirio en el material de relave y los sedimentos fluviales. Además, se encontraron sulfatos solubles en forma de eflorescencias en el relave, principalmente dietrichita, melanterita y bilinita, junto con otros minerales de sulfato de aluminio, hierro y zinc.

Las muestras de sedimentos fluviales de zonas no contaminadas muestran concentraciones aproximadas de elementos como hierro de 41.000 mg/kg, aluminio de 11.400 mg/kg, magnesio de 3.600 mg/kg, zinc de 1.300 mg/kg, cobre de 120 mg/kg, plomo de 170 mg/kg, azufre bajo 500 mg/kg y cadmio de 6,81 mg/kg, a diferencia del sedimento fluvial contaminado que muestra concentraciones aproximadas de 34.000 mg/kg de hierro, 750 mg/kg de zinc y 230 mg/kg de plomo. Por otro lado, las eflorescencias presentaron concentraciones extremadamente altas de aluminio, magnesio, azufre y zinc, con valores entre 8.000 y 20.000 mg/kg. En cuanto al material de relave, se observaron altas concentraciones de cadmio, cobre, azufre, plomo y zinc, superando los 3.000 mg/kg para estos elementos. A través del cálculo de los factores de contaminación según la propuesta de Hakanson, se determinó que las eflorescencias presentaban factores de contaminación extremadamente altos, mientras que el material de relave mostraba concentraciones y factores de contaminación elevados para varios elementos, indicando una alta contaminación.

La mineralogía encontrada es consistente con los sulfatos de aluminio, magnesio y zinc presentes en las eflorescencias, lo que sugiere una alta tasa de oxidación de los sulfuros asociados a la lixiviación de los minerales presentes en el relave. Estos resultados resaltan la importancia de comprender la geoquímica y mineralogía presentes para evaluar el impacto ambiental y desarrollar estrategias de control, mitigación y rehabilitación de los contaminantes en la zona. Además, se destaca la necesidad de implementar prácticas adecuadas de manejo y mantenimiento de los depósitos de relave, así como fomentar la investigación continua para mejorar la comprensión de los procesos geoquímicos involucrados y buscar soluciones sostenibles en la gestión de los residuos mineros.

Palabras Clave: Relave, Contaminación, Mineralogía, Geoquímica, Mitigación.

Principales factores que controlan la dispersión de metales pesados en torno al relave abandonado Las Palmas, región del Maule, Chile

Álvaro Antonio Navarrete Calvo¹⁻², Camilo Sánchez¹⁻², Fabian Muñoz Bastias³, María Paz Muñoz¹⁻⁴, Ignacia Vidal¹

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Cobrizo Geología Ambiental, Linares, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología, Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(4) Amphos 21 Consulting Chile Ltda., Av. Nueva Tajamar 481 Of. 1005, Santiago, Chile

La contaminación con metales/oides potencialmente tóxicos representa uno de los peligros ambientales de mayor preocupación en contextos de pasivos mineros abandonados. Este problema se hace crítico para los pasivos que fueron abandonados antes de la promulgación de la ley de plan de cierre de minas, puesto que no había una exigencia de responsabilidad ambiental a la industria, con estándares de estabilidad física y química, al cierre de las instalaciones. Dejando así la responsabilidad al Estado, el cual, a pesar de grandes esfuerzos a través de sus instituciones públicas, no ha dado abasto para la caracterización y monitoreo de los remanentes mineros.

En esta investigación se presenta un caso emblemático en Chile, el relave abandonado Las Palmas. Este colapsó parcialmente durante el terremoto del 2010, sobre casi 11 Hás, producto de su inestabilidad física, cobrando la vida de 4 personas y dejando sus residuos sobre dos esteros naturales. Afectando entre otras especies, a la Palma Chilena, que destaca por ser la palmera más austral del mundo y por estar en peligro de extinción. Los residuos del relave provienen del material extraído y tratado desde la ex-mina Las Palmas, que explotaba Au y Cu asociado a sulfuros como blenda, galena y calcopirita de un yacimiento epitermal. El objetivo de este estudio es entender cómo funciona la dispersión de metales/oides alrededor del relave, tanto en agua, suelos y sedimentos fluviales. Además de poder hacer una evaluación de impacto ambiental, en términos de calidad de aguas y de sedimentos.

Entre 2021 y 2023 se realizaron muestreos para análisis químicos, mineralógicos y de microscopía de los distintos materiales de la zona: relave, sedimentos fluviales y sedimentos de suelo aledaños al relave. La composición química se obtuvo a través de ICP-OES, previa digestión con agua regia, mientras que la mineralogía mediante DRX, y la microscopía mediante SEM. Además, se tomaron muestras de agua de los dos esteros colindantes al relave, tanto aguas arriba como aguas abajo de éste, analizando iones mayoritarios y elementos traza, por medio de ICP-OES/MS.

Dentro de los resultados mineralógicos más importantes, se detectaron sulfuros en el relave y en los sedimentos fluviales, capaces de generar drenaje minero por disolución oxidativa. Además, presencia de minerales secundarios, como sulfatos (grupo de jarosita) y óxidos de Pb y Zn, en las inmediaciones del relave y de los sedimentos fluviales más cercanos. Por último, destaca la presencia de eflorescencias superficiales, compuestas por sulfatos como dietrichita, que provendrían de evapoconcentración de soluciones ácidas. La química encontrada es consistente con la mineralogía en este sitio, en términos de altas concentraciones de S y metales pesados como Cd, Cu, Pb y Zn, en los sulfatos y eflorescencias. Aguas abajo la química de los sedimentos supera normativas de calidad ambiental de sedimentos para ecosistemas de agua dulce continental. Por lo tanto, la evidencia mineralógica, geoquímica y textural de las micromorfologías, sugieren que de forma cíclica e intermitente se genera drenaje ácido de minas, probablemente sólo cuando se dan precipitaciones en forma de lluvia sobre las partes descubiertas del relave. En términos de contaminación, el mayor peligro lo constituirían las eflorescencias por sus altísimas concentraciones de metales pesados, que fácilmente podrían sufrir transporte eólico en temporadas secas, por su bajo tamaño de grano y peso, así como también sufrir transporte por agua, dada su alta solubilidad. De esta manera las eflorescencias podrían ser el mejor vector de transporte, siendo capaces de contaminar aguas, suelos y la biota a su alrededor.

Por su parte y de forma contra intuitiva, el agua de los esteros aledaños tiene buena calidad de agua y no muestran influencia de drenaje minero ni ácido, lo que se explica producto del bajo e intermitente aporte de aguas de contacto del relave hacia los esteros, permitiendo una mezcla que diluye las concentraciones de contaminantes y neutraliza el pH mediante la alcalinidad que poseen las aguas de los esteros naturales. Sin embargo, esta situación podría cambiar en el contexto de cambio climático, en donde se pueden dar escenarios de sequía para los esteros y luego lluvias que liberen drenaje ácido del relave, sin que los esteros tengan los caudales necesarios para atenuar la contaminación. Razón por la cual seguiremos monitoreando el sistema en el tiempo. Por último, y en la misma línea del cambio climático, es necesario tener claridad de potenciales impactos erosivos del material potencialmente tóxico del relave producto de crecidas durante eventos extremos de precipitaciones, que puedan remover y transportar los contaminantes por amplias extensiones de terreno.

Palabras Clave: Drenaje minero, relave abandonado, Contaminación ambiental, Metales pesados, Eflorescencias.

Agradecimientos: Agradecemos al Lab. de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB) y al Lab. Centro de Nanotecnología Aplicada (CNAP) de la U. Mayor, por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional.

Influencia del colapso del tranque de relave Las Palmas en la hidroquímica en las aguas subterráneas y superficiales del estero Las Palmas y Los Ladrones, Región del Maule

Ignacia Vidal¹, Álvaro Navarrete¹⁻², Camilo Sánchez¹⁻²

(1) Universidad Mayor, ciencias, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(2) Cobrizo-Geología ambiental, Casa matriz, Linares, Chile

El tranque de relave Las Palmas está compuesto por compuesto por brecha andesítica del Cretácico con mineralización primaria de pirita, calcopirita, galena, blenda y especularita, ubicado en la comuna de Botalcura, sector Las Palmas en la Región del Maule. El 27 de febrero del 2010 producto del terremoto colapsó material del tranque y quedó derramado en 10.86 hectáreas de suelo y ribera de los esteros Las Palmas y Los Ladrones. El tranque de relave está abandonado desde el año 1998, antes de que estuviera en vigencia la Ley 20.551 el año 2012, que exige planes de cierre con estabilidad geoquímica. Actualmente, se encuentra cubierto por una geomembrana sin mantención y áreas donde la geomembrana fue retirada, y de esta manera existiría una alta capacidad de generar drenaje minero producto del contacto de los depósitos con las condiciones ambientales. Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia que genera el tranque de relave en las aguas superficiales y subterráneas mediante la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas que incluye análisis de diagramas piper, stiff, variación espacial de pH, C.E, alcalinidad y sulfato, diagramas binarios y diagramas de metales totales versus disueltos. Las campañas de terreno se desarrollaron en esteros aledaños al tranque de relave, en julio, septiembre y noviembre del año 2022. Se midieron parámetros fisicoquímicos T°, pH, C.E y redox con el multiparámetro HI 98194 y concentraciones de alcalinidad y sulfato con Test kit HI 3817 y Kit Maleta HI 97751C. Se recolectaron 5 muestras de agua (1 de agua subterránea en el relave y 4 de agua superficial, 2 aguas antes del relave y 2 aguas después del relave) donde se midieron cationes totales y disueltos mayoritarios mediante ICP-OES, mientras que los traza y totales disueltos por medio de ICP-MS. La alcalinidad mediante titulación, mientras que aniones por medio de cromatografía iónica.

Los resultados preliminares arrojaron que el agua antes del relave en estero Las Palmas es cloruradas cálcicas, en estero Los Ladrones bicarbonatadas magnésicas, y después del relave en la confluencia de ambos esteros sulfatadas cálcicas -magnésicas. Las aguas superficiales vienen con una concentración alta de alcalinidad (115 mg/l en estero Los Ladrones y 186 mg/l en estero Las Palmas). No se puede decir lo mismo de la C.E y del sulfato porque las aguas de estero Las Palmas viene con una C.E mayor (491 uS/cm) a estero Los ladrones (120 uS/cm), al igual que el sulfato el cual es mayor en estero Las Palmas (56 mg/l) y mucho menor en estero Los Ladrones (11 mg/l). En las aguas subterráneas hay una diferencia notable en los valores de la C.E, alcalinidad y el sulfato. El agua subterránea en el relave tiene valores de 1088 uS/cm C.E, 74 mg/l de alcalinidad y 208 mg/l de sulfato mientras que, el agua subterránea de la noria 2 km aguas abajo del relave de 422 uS/cm, 111 mg/l y de 6 mg/l, respectivamente. Las concentraciones de metales disueltos (Al, Ba, B, Sr, P, Fe, Mn, Pb, Zn) en las aguas superficiales y subterráneas son bajas del rango 0,1 a 1,9 mg/l, mientras que los totales (Al, Ba, B, Co, Sr, P, Fe, Mn, Zn) entre 0,1 y 2,1 mg/l. Entre las rocas y las aguas del sector Las Palmas, el intercambio iónico es de Na y K pasando de la roca al agua, y el Ca y Mg del agua a la roca. Las aguas superficiales muestran una tendencia 1:1 de HCO₃ v/s Na lo que indicaría disolución de plagioclasa sódica (albita), el agua subterránea se escapa de esta tendencia porque proporcionalmente tiene una mayor concentración de Na respecto a las aguas superficiales. La buena correlación entre Na, Ca y Mg respecto al SO₄ podría provenir del mismo proceso de formación, que se puede atribuir a la disolución de sulfuros y minerales silicatadas contenidos en el tranque de relave. Las bajas concentraciones de metales disueltos (Al, Ba, B, Sr, P, Fe, Mn, Pb, Zn) y ausencia de Cu y Mg serían porque habrían sido precipitados como sulfuros y óxidos a partir del proceso de absorción. La alta alcalinidad de las aguas se atribuye a la disolución de plagioclasas sódicas (albita) que al interactuar con el H₂O y CO₂ del suelo liberan al agua HCO₃, el cual neutraliza el pH de las aguas y permite mantener en el sistema un rango de pH neutro – alcalino debido a la presencia de rocas silicatadas según la geología del área de estudio de composición andesítica, riolítica, gabros y monzodioritas que en su composición tienen plagioclasas sódicas.

Palabras Clave: Oxidación, disolución, alcalinidad, absorción.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración del Departamento de Operaciones AGQ Labs & Technological Services por el uso de instrumental de análisis para muestras de agua.

Referencias:

- Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA). (2017). Estudio de Riesgo Ambiental tranque de relaves Las Palmas, Comuna de Péncahue, Región del Maule. Fundación de la Universidad de Chile para la Secretaría Regional Ministerial de Medio Ambiente, Región del Maule, Santiago, Chile.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica (DICTUC). (2010). Evaluación preliminar de contingencia en tranque de relaves Las Palmas, sector Péncahue, Región del Maule.
- Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Región del Maule, Chile. Ministerio de Secretaría General de la Presidencia. (1994). Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), Santiago, Chile.
- Obrador. R. (2011). Ley 2.0551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. Departamento de Servicios Legislativos y Documentales, Santiago, Chile.

Contributing to sustainable and climate-resilient groundwater management in the North Sea region using geoelectrical and electromagnetic methods

Bárbara Blanco Arrué¹, Mike Müller-Petke¹, Jan Igel¹, Raphael Rochlitz¹, Thomas Günther¹, Mathias Ronczka¹, Eva González², Jörg Elbracht²

(1) Leibniz Institute for Applied Geophysics, Geoelectrics & Electromagnetics, Stilleweg 2, 30655, Hannover, Germany
 (2) State Authority for Mining, Energy and Geology (LBEG), Geozentrum Hannover, Stilleweg 2, 30655, Hannover, Germany

In times of climate change, the *Blue Transition* is an Interreg North Sea Region project aiming for a systematic change by integrating water and soil management and balancing urban, agricultural, and natural activities. In this interdisciplinary project, 16 European pilots account for the complex and cross-cutting relationships between climate adaptation and water management. The goal is to ensure the quality and quantity of water for the future while helping to revitalize natural habitats and reduce CO₂ emissions.

This research focuses on the *Geest Adaptation - GE2* pilot, including areas of the Gnarrenburg peatland and the Bederkesa geest area, northeast of Lower Saxony, Germany (GE2 Geest Adaptation, 2023). It is well known that the advancing climate change and human use heavily stress the groundwater and soil resources. In the GE2 pilot we seek to combine Managed Aquifer Recharge (MAR) strategies by infiltration in the Geest area with rewetting of peatlands to improve the regional water balance and to decrease CO₂ emission. Furthermore, rewetting peatland and MAR water storage in the Geest might push the up-rising saline groundwater, currently located about 100 m beneath the surface, downwards (González et al., 2021; Siemon et al., 2015). A key point of the management of groundwater and soils towards sustainable use is the effective transfer, adaptation, and applicability of geophysical techniques in close cooperation with water suppliers, farmers, and water and soil boards in the study site.

Electromagnetic methods in applied geophysics are valuable for subsurface imaging and characterization based on physical properties such as electrical conductivity and dielectric permittivity. This work aims to improve the knowledge of the structure and temporal evolution of groundwater systems in the study area by using Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT), Nuclear Magnetic Resonance (NMR), and semi-airborne Electromagnetics (SAEM). GPR, ERT, and NMR are carried out to obtain information on peatland thickness, side-to-side measurement, and the occurrence extent of clay and silt layers in the sandy Geest sediments. At the same time, SAEM will be performed to provide the necessary deep information on the subsurface structure and monitor the fresh/saline groundwater interface. Preliminary GPR results in the Gnarrenburg area show areas with a maximum peatland thickness of about 4.5 m. The ERT and SAEM data will be processed, analyzed, and inverted through open-source EM codes such as *pyGIMLi* (Rücker et al. 2017) and *custEM* (Rochlitz et al. 2019). Furthermore, the geophysical data will be integrated with borehole logging data to obtain a detailed hydrogeological 3D model. The effect of climate change on groundwater is expected to be simulated using changing recharge rates according to Lower Saxony's climate ensemble based on the actual Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report (Hajati et al., 2022).

It is imperative to acknowledge that the effects of climate change know no boundaries, impacting ecosystems and communities on a global scale. Increasing temperatures, changing precipitation patterns, and water scarcity are just a few challenges Chilean communities face. While the Blue Transition initiative focuses primarily on the North Sea Region, it is an inspirational model for addressing similar challenges faced by countries like Chile in South America. Therefore, by highlighting the efforts of the Blue Transition project, we can draw parallels between the experiences of Europe and South America, fostering a collective understanding and collaboration in tackling the shared issues of climate change and sustainable water management.

Keywords: Groundwater systems, Climate change, Applied geophysics, Resistivity, Electrical conductivity.

Financing: This project is co-funded by the Interreg North Sea Region (Blue Transition, project number 41-2-12-22).

Acknowledgments: We would like to express our sincere gratitude and appreciation to all those who have contributed to the development and success of this poster presentation.

References:

- GE2 (2023). Geest Adaptation: Effects of peatland renaturation on groundwater system. Blue Transition | Interreg North Sea, accessed May 2023. <https://www.interregnorthsea.eu/blue-transition/pilots/ge2-geest-adaptation>.
- Hajati, M., Harders, D., Petry, U., Elbracht, J. & Engel, N. (2022). Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1. – Geofakten 39: 15 S., 1 Abb., 4 Tab., Anh.; Hannover (LBEG).
- González, E., Deus, N., Elbracht, J., Azizur Rahman, M., & Wiederhold, H. (2021). Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. *Grundwasser*, 26(4), 343-356.
- Rochlitz, R., Skibbe, N. and Günther, T. (2019). *custEM*: customizable finite element simulation of complex controlled-source electromagnetic data, *GEOPHYSICS Software and Algorithms*, 84(2), F17-F33, <https://doi.org/10.1190/geo2018-0208.1>.
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. M. (2017). *pyGIMLi*: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106-123. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>.
- Siemon, B., Costabel, S., Voß, W., Meyer, U., Deus, N., Elbracht, J., Günther, T. and Wiederhold, H. (2015). Airborne and ground geophysical mapping of coastal clays in Eastern Friesland, Germany. *Geophysics*, 80(3), WB21-WB34.

Contribución de las rocas fracturadas a la recarga del acuífero aluvial de la quebrada El Arrayán, región de Coquimbo

Etienne Bresciani¹⁻²⁻³, Ronny Figueroa¹⁻², Yerelin Ivette Cárcamo Palma¹⁻², Matías Taucare⁴, Diego San Martín¹⁻²⁻⁵

(1) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, La Serena, Chile

(2) Consorcio Tecnológico del Agua Quitai-Anko, La Serena, Chile

(3) Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

(4) Universidad de Chile, Santiago, Chile

(5) Universidad de La Serena, La Serena, Chile

El rol y la importancia de las rocas fracturadas para los recursos hídricos subterráneos son muy debatidos en Chile actualmente. Históricamente, las rocas fracturadas han sido consideradas como un medio casi impermeable, sin ser consideradas como los hídricos sustanciales (e.g., DGA, 1986). Sin embargo, debido a la delicada situación hídrica actual del país, ha incrementado la idea de explotar el agua subterránea en medios fracturados. En este contexto, es fundamental establecer una línea base de conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico de las rocas fracturadas en Chile y de su interacción con los otros componentes del ciclo hidrológico.

En este estudio, llevamos a cabo una evaluación de la contribución de las rocas fracturadas a la recarga del acuífero aluvial de la quebrada El Arrayán, región de Coquimbo. Esta quebrada se ubica en la Cordillera de la Costa y es caracterizada por un clima árido. El fondo del valle alberga un acuífero aluvial de espesor de hasta 40 m y de ancho de hasta 800 m. Un río efímero se forma en el valle durante eventos intensos de precipitación, producto de la convergencia del escurrimiento superficial generado en las laderas. En tal contexto, la literatura generalmente sugiere que la fuente principal de recarga del acuífero aluvial es la infiltración del río efímero, descartando un potencial rol significativo de las rocas fracturadas (e.g., Scanlon et al., 2002). Sin embargo, estudios recientes en Chile Central han evidenciado que las fracturas presentes en las rocas pueden conducir agua y que están conectadas a los acuíferos aluviales aguas abajo (Taucare et al., 2020; Figueroa et al., 2021; Marti et al., 2023). Si bien aún no se ha cuantificado la magnitud de estos flujos, las rocas fracturadas podrían constituir una fuente de recarga significativa para los acuíferos aluviales. Para probar esta hipótesis, se realizó un estudio combinando múltiples métodos.

El nivel freático fue monitoreado en tiempo casi continuo (frecuencia de medición: 10 min) a partir de agosto del 2021, tanto en el acuífero aluvial como en el acuífero de roca fracturada. Los datos muestran una leve tendencia negativa de los niveles hasta un evento intenso de precipitación en julio del 2022, momento en que el nivel subió varios metros en todos los pozos monitoreados. Entre 0,5 y 2 meses más tarde, luego de estabilizarse o de empezar a descender, los niveles volvieron a subir en todos los pozos, registrando hasta 1,3 m de ascenso. Este segundo ascenso ocurrió sin presencia de precipitaciones en este periodo. A partir de lo anterior, proponemos que el primer ascenso de los niveles corresponde a la recarga focalizada del acuífero aluvial por infiltración del río efímero que se formó durante el evento de precipitación; mientras que el segundo ascenso resultaría de la infiltración de la lluvia en las laderas, donde el tiempo de percolación en la zona no saturada provoca un desfase temporal entre las dos respuestas. La razón por la cual ambas respuestas se ven tanto en los pozos del acuífero aluvial, como en los pozos del acuífero de roca fracturada sería que exista una buena conexión hidráulica entre los dos acuíferos.

Para estimar la recarga de ambos medios hidrogeológicos, se emplearon tres métodos: (i) se estimó la recarga de ambos acuíferos, tanto el aluvial como en el de roca fracturada, con el modelo distribuido de escorrentía superficial-infiltración SWB (Westenbroek et al., 2018); (ii) la recarga del acuífero aluvial fue estimada con el método de fluctuación del nivel freático (Healy and Scanlon, 2020); (iii) la recarga del acuífero de roca fracturada fue estimada con el método de balance de masa de cloruro (Healy and Scanlon, 2020). Los resultados indican que el volumen de recarga en el acuífero de roca fracturada es significativo en comparación al del acuífero aluvial. Finalmente, la contribución de las rocas fracturadas a la recarga del acuífero aluvial fue evaluada con un modelo de flujo subterráneo basado en el código MODFLOW. El modelo abarca toda la zona de estudio, cubriendo tanto el acuífero aluvial como el acuífero de roca fracturada. Los resultados indican que los flujos desde las rocas fracturadas hacia el acuífero aluvial son significativos en comparación al flujo total del acuífero aluvial, el cual fue evaluado con el mismo modelo.

En su conjunto, los resultados de este estudio sugieren que las rocas fracturadas contribuyen significativamente a la recarga del acuífero aluvial de la quebrada El Arrayán. Este resultado contrasta con la creencia popular de que la recarga de los acuíferos aluviales en zonas áridas proviene casi solamente de la infiltración de los ríos efímeros.

Palabras Clave: Acuíferos, Agua subterránea, Roca fracturada, Recursos hídricos, Coquimbo.

Financiamiento: Proyecto "Modelo de balance hídrico en acuífero de roca fracturada" 19-CTIGH-121324-03, una línea del Consorcio Tecnológico del Agua Quitai-Anko financiado por CORFO.

Referencias:

- DGA, 1986. Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional. DGA, Santiago, Chile.
- Figueroa, R., Viguié, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>.
- Healy, R.W., Scanlon, B.R., 2010. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press.
- Marti, E., Leray, S., Villela, D., Maringue, J., Yáñez, G., Salazar, E., Poblete, F., Jiménez, J., Reyes, G., Poblete, G., Huamán, Z., Figueroa, R., Araya Vargas, J., Sanhueza, J., Muñoz, M., Charrier, R., Fernández, G., 2023. Unravelling geological controls on groundwater flow and surface water-groundwater interaction in mountain systems: a multi-disciplinary approach. *Journal of Hydrology* 129786. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129786>.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 347–347. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguié, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of The Total Environment* 722, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.
- Westenbroek, S.M., Engott, J.A., Kelson, V.A., Hunt, R.J., 2018. SWB Version 2.0—A soil-water-balance code for estimating net infiltration and other water-budget components, Techniques and Methods. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/TM6A59>.

Distribución espacial del potencial de aguas subterráneas en la Región de Coquimbo, Chile

Benjamín Carriel¹⁻²⁻³, Etienne Bresciani¹⁻²⁻⁴, Álvaro Navarrete³

- (1) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
(2) Consorcio Tecnológico del Agua Quintai-Anko
(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Chile
(4) Universidad de O'Higgins

Durante los últimos años, en Chile ha habido un aumento en la demanda de agua debido al crecimiento demográfico y al desarrollo económico. Además, los efectos del cambio climático y las sequías en las fuentes de agua superficial, han generado la necesidad de buscar otras alternativas, como el aprovechamiento de aguas subterráneas. En este margen, en la Región de Coquimbo la exploración de los recursos hídricos subterráneos se ha enfocado en gran parte en los valles principales, por lo que existe un escaso conocimiento sobre el potencial de las aguas subterráneas en valles secundarios y en laderas rocosas. Es por esto que en este estudio se está llevando a cabo un mapa del potencial de aguas subterráneas en toda la región, permitiendo identificar zonas que favorecen la acumulación y recarga de agua subterránea.

La región de Coquimbo se caracteriza por estar en una zona de transición entre clima mediterráneo con clima semiárido y clima de tundra. La zona litoral presenta influencia costera, mientras que la zona cordillerana se encuentra influenciada por la altura. Las precipitaciones en esta zona son escasas y se concentran principalmente en los meses de invierno, con un promedio anual de 100 mm en la zona costera y 300 mm en la zona cordillerana. Además, la mega sequía que ha afectado a Chile desde 2010, ha agravado la situación hídrica de la región.

La evaluación del potencial de aguas subterráneas realizada en este estudio se basa en la interpretación y análisis de datos geoespaciales (Allafta, 2020). Las variables utilizadas son la pendiente, geomorfología, densidad de lineamientos, geología, uso de suelo, tipo de suelo, densidad de drenaje y precipitaciones. Estas variables controlan aspectos claves que determinan el potencial de aguas subterráneas como la recarga, la transmisividad y la profundidad del nivel freático (Gupta, 2010). La pendiente del terreno y la geomorfología influyen en la recarga y en la profundidad del nivel freático respectivamente, mientras que los lineamientos estructurales pueden actuar como zonas preferenciales para la recarga y el flujo subterráneo (es decir suelen presentar mayor transmisividad). La geología es un factor determinante de las propiedades hidráulicas como la transmisividad. El uso de suelo, incluyendo áreas urbanizadas o de agricultura, puede modificar la recarga del agua subterránea. Mientras que el tipo de suelo tiene influencia en la infiltración y por lo tanto la recarga. Finalmente, la densidad de drenaje es una función inversa de la transmisividad, mientras que las precipitaciones constituyen una fuente esencial de recarga en el sistema subterráneo.

En cada punto del área de estudio se asigna una valorización asociada a cada variable. Luego, las variables se combinan en un índice de potencial de aguas subterráneas, que se calcula como una suma ponderada de los puntajes asociados a todas las variables (Díaz, 2019). Las ponderaciones caracterizan la importancia de cada variable en este cálculo y se determinaron mediante la revisión de literatura previa sobre mapas de potencial de agua subterránea en rocas fracturadas y depósitos sedimentarios. El resultado final es un mapa completo del potencial de aguas subterráneas en el área de estudio.

El análisis preliminar revela diferencias significativas del potencial de aguas subterráneas entre las principales macroformas de la región de Coquimbo, como la cordillera de los Andes, la cordillera de la Costa y las planicies litorales. Dado este análisis, es posible identificar áreas donde puede existir un mayor potencial debido a la magnitud y desarrollo de los valles, que están directamente ligados a la recarga, propiedades hidráulicas y profundidad del nivel freático.

Palabras Clave: acuíferos, recursos hídricos subterráneos, valles secundarios, roca fracturada.

Financiamiento: Proyecto "Modelo de balance hídrico en acuífero de roca fracturada" 19-CTIGH-121324-03, una línea del Consorcio Tecnológico del Agua Quintai Anko financiado por CORFO.

Referencias:

- Allafta, H., Opp, C., & Patra, S. (2020). Identification of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Shatt Al-Arab Basin. *Remote Sensing*, 13(1), 112.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific reports*, 9(1), 2082.
- Díaz-Alcaide, S., & Martínez-Santos, P. (2019). Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2307-2324.
- Gilbert, J. T., Macfarlane, W. W., & Wheaton, J. M. (2016). The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Computers & Geosciences*, 97, 1-14.
- Gupta, M., & Srivastava, P. K. (2010). Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. *Water International*, 35(2), 233-245.
- Sander, P., Chesley, M. M., & Minor, T. B. (1996). Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal*, 4, 40-49.

El rol del agua subterránea en la seguridad energética y alimentaria: oportunidad y desafíos para Chile

Linda Daniele¹⁻², Diego Morata¹, Benoît Viguière³⁻⁵, Matías Taucare¹⁻², James McPhee²⁻⁴, Daniele Tardani⁵, Ismael Casado¹, Rodrigo Fuster²⁻⁶, Alida Perez-Fodich¹, Cristóbal Galbán Malagón⁷⁻⁸

(1) Universidad de Chile, Geología-Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Centro Avanzado para las Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, Niza, Francia

(4) Universidad de Chile, Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(5) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(6) Laboratorio de Análisis Territorial, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(7) Centro GEMA (Genómica, Ecología y Medio Ambiente), Universidad Mayor, Santiago, Chile

(8) Institute for Environment, Florida International University, Miami, FL, USA.

El suministro de agua, seguro y sostenible representa uno de los desafíos globales más importantes para el siglo XXI. La cantidad de agua presente en nuestro planeta tiene que satisfacer la creciente demanda asociada a la globalización y crecimiento poblacional. Sin embargo, los últimos acontecimientos mundiales (i.e. guerra Rusia-Ucrania) han evidenciado la importancia de poder sostener la demanda de agua y energía desde la perspectiva nacional, para así reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles (que la mayoría de los países no producen) y, a su vez, fortalecer la seguridad alimentaria de las naciones. Tradicionalmente, el agua superficial ha suplido la demanda hídrica para la producción de alimentos y energía. No obstante, ante los escenarios de cambio climático actuales el recurso superficial se ha visto afectado tanto en calidad como en cantidad, no siendo suficiente para abastecer la demanda de agua. Es, de esta forma, que las aguas subterráneas están jugando un rol clave para enfrentar la paulatina necesidad de agua para la producción de alimentos y energía (Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012; Megdal, 2018). Los datos reportados indican que, en la década pasada, las aguas subterráneas abastecieron el 36% del agua potable, el 43% de la agricultura de regadío y el 24% de la demanda directa de agua industrial (Döll et al., 2012). El uso de agua subterránea está creciendo a un ritmo del 5% anual (Zhang et al., 2021) y se estima que para el 2050 la demanda de alimentos y agua aumentará en un 50% respecto la demanda actual (Ferroukhi et al., 2015).

Finalmente, todas las consideraciones anteriores ponen de manifiesto la relevancia de abordar, desde una sólida base científica, los desafíos asociados a las complejas interacciones entre el agua, la energía y los alimentos. Es así como, globalmente, los acuíferos han adquirido un rol aún más estratégico por su capacidad de proporcionar tanto agua como energía térmica (geotermia somera), permitiendo reducir la dependencia de las fuentes de energía tradicionales.

El subsuelo es una fuente de energía térmica limpia e independiente de las condiciones climáticas, que puede contribuir significativamente a las necesidades energéticas requeridas en la industria alimentaria. El uso de los acuíferos con esta doble finalidad, podría ser especialmente relevante en áreas urbanas donde actualmente vive más del 50 % de la población mundial y que son zonas importantes de emisiones de gases de efecto invernadero hasta (Vargas et al., 2022).

Entender y gestionar la interdependencia de los recursos hídricos, la generación de energía y la producción de alimentos depende fuertemente de datos e información confiables sobre estos recursos. Esto significa que es necesario conocer en detalle el funcionamiento de los acuíferos y del subsuelo para poder establecer el potencial de generación de energía a destinar para climatización de edificios, industrial y para asegurar las cosechas, protegiéndolas no solo de las heladas sino de las siempre más frecuentes olas de calor.

Un análisis de la situación en Chile revela que, si bien se ha avanzado en algunos aspectos, aún queda por abordar varios hitos necesarios para la transición hídrica, energética y alimentaria que el mundo actual demanda, y este enfoque integrado es una herramienta para lograrlo. Sin embargo, este desafío se vuelve cuesta arriba si no se cuenta con una red de monitoreo continuo y en tiempo real, específicamente enfocada en el control de las aguas subterráneas que permita tener respuestas a preguntas relevantes (zonas de recarga, profundidad y variación del agua en la zona crítica, capacidad térmica) para una eficiente gestión integrada.

Los autores están analizando el nexo entre agua-energía-alimento en Chile Central desentrañando aspectos del ciclo hidrológico desde las montañas hasta los valles. Por ahora, los datos preliminares revelan que las aguas superficiales están siendo afectadas por la acción antrópica. Los datos recopilados indican que la Cordillera de los Andes juega un rol relevante en la renovación de los recursos hídricos subterráneos y se ha detectado un vaciado extremo y generalizado de los acuíferos. En particular, este último punto, nos indica una reducción del almacenamiento de los acuíferos, lo que dificulta además el uso energético para climatización y agricultura. A medida que los niveles piezométricos se profundizaron con el tiempo, se requiere de más energía para alumbrar agua en superficie proyectándose en un sendero no virtuoso de sostenibilidad.

Finalmente, las temperaturas medidas en los acuíferos son generalmente aptas para realizar proyectos de climatización y tecnificación agrícola que permitan fortalecer nuestra seguridad alimentaria en el corto plazo.

Palabras Clave: agua subterránea, nexo agua-energía-alimento, sustentabilidad, áreas urbanas.

Financiamiento: Este trabajo es una contribución al Proyecto ATE220029 "The water-energy-food nexus for urban areas in central Chile (wef-Chile)" financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) en el concurso Anillo de Investigación en Áreas Temáticas Específicas 2022.

Referencias:

- Aeschbach-Hertig, W., Gleeson, T., 2012. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience* 2012 5:12 5, 853–861. <https://doi.org/10.1038/ngeo1617>.
- Megdal, S.B., 2018. Invisible water: the importance of good groundwater governance and management. *Npj Clean Water* 1, 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0015-9>.
- Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F.T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G., Scanlon, B.R., 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics* 59–60, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.001>.
- Ferroukhi, R., Nagpal, D., Lopez-Peña, A., Hodges, T., Mohtar, R.B., Dahel, B., Mohtar, S., Keulertz, M., 2015. Renewable Energy Auctions: A Guide to Design. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Zhang, J., Cho, H., Mago, P.J., 2021. Energy conversion systems and Energy storage systems. *Energy Services Fundamentals and Financing* 155–179. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820592-1.00007-5>.
- Vargas, C.A., Caracciolo, L., Ball, P.J., 2022. Geothermal energy as a means to decarbonize the energy mix of megacities. *Communications Earth & Environment* 2022 3:1 3, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00386-w>.

Los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en la parte media – alta de la Cuenca de Petorca, Región de Valparaíso, Chile. Nuevas perspectivas para el estudio del agua subterránea

Denisse De la Fuente¹

(1) Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México

1. Introducción

La cuenca de Petorca es un emblema de la crisis socioambiental por el acceso al agua en Chile. Severas y prolongadas sequías han dispuesto al agua subterránea como la única fuente de agua para la subsistencia humana y las actividades económicas. Motivado por el agotamiento de los ríos y la intensiva extracción de agua que sustenta al agronegocio en la zona, numerosos estudios hidrogeológicos han buscado definir cuánta agua “queda” en el subsuelo y predecir la respuesta hidrológica ante escenarios futuros. Sin embargo, al analizar las bases teóricas-metodologías aplicadas, surgen inconsistencias que ponen en duda su veracidad y utilidad para la gestión del agua.

El presente trabajo buscó analizar la relación entre el agua subterránea y los componentes socioambientales en la parte media-alta de la cuenca de Petorca (comuna homónima), con el fin de proporcionar evidencias sobre el funcionamiento del sistema hidrogeológico, que ayuden a mejorar la gestión del agua y las políticas para su conservación. El estudio se abordó desde la **Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea** (Tóth, 1963), que ofrece una perspectiva sistémica sobre el funcionamiento, calidad y distribución del agua subterránea.

2. Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (SFAS)

Teoría sustentada en evidencias geofísicas e hidrológicas que demuestran la interrelación del agua subterránea con los componentes ambientales (rocas, suelo, vegetación), y en fundamentos químicos e isotópicos que prueban la conexión hidráulica subterránea entre cuencas adyacentes. Considera la existencia de 3 tipos de flujos subterráneos: **local, intermedio y regional**. Cada sistema de flujo tiene su propia zona de recarga, circulación y descarga; viajan por trayectos específicos, con distintas litologías, longitudes y profundidades (Carrillo-Rivera y Cardona, 2012). Por tanto, cada sistema presenta diferente composición química e isotópica, edad y propiedades fisicoquímicas, determinados por el tiempo y condiciones de interacción entre el agua y el medio geológico. En función de ello, se originan determinadas configuraciones geomorfológicas, de suelo y vegetación, constituyendo indicadores superficiales de la influencia de un sistema de flujo específico.

Los flujos locales se caracterizan por una trayectoria corta y somera. Los flujos intermedios tienen una trayectoria y profundidad mayor, descargando dentro de la misma cuenca donde se originaron. En cambio, los flujos regionales se originan en la divisoria de aguas y descargan en la parte más baja de la cuenca o incluso fuera de ella, con trayectos de mayor longitud y profundidad. El límite inferior del sistema hidrogeológico corresponde a la roca basamento: unidad geológica impermeable constituida por rocas metamórficas y/o intrusivas, que infrayace a la unidad por la que circulan los flujos regionales (Carmona *et al.*, 2017).

3. Marco Geológico

En la zona de estudio se presentan rocas cretácicas a neógenas, sobre un basamento magmático-metamórfico Paleozoico-Triásico (Levi, 1970). Afloran mayoritariamente secuencias cretácicas sedimentarias (marinas y continentales), y lavas predominantemente andesíticas. También se hallan intrusivos batolíticos del Cretácico Superior, tonalíticos a graníticos, y cuerpos aislados dioríticos a graníticos. Cubriendo parcialmente a estas rocas, se disponen depósitos semiconsolidados fluvio-aluviales del Mioceno-Plioceno y depósitos cuaternarios no consolidados. Se distinguen 2 macroestructuras de rumbo aproximado N-S: 1) Zona de falla Pocuro (normal); 2) Sistema de fallas Quebrada de Castro, El Bronce y Petorca-El Durazno (dextrales). Existen zonas de alteración hidrotermal asociadas al magmatismo cretácico y a los yacimientos polimetálicos epitermales (Au-Ag-Cu-Pb-Zn) emplazados en las secuencias volcánicas.

4. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Para identificar los SFAS se realizó análisis químicos e isotópicos de 16 muestras colectadas en pozos (profundidad < 80 m) situados en los principales cauces de la cuenca, y la medición en campo de sus parámetros fisicoquímicos: temperatura (T), pH, potencial redox (Eh), conductividad eléctrica (CE), concentración de oxígeno disuelto (OD) y alcalinidad. Para establecer su jerarquía, se utilizaron los siguientes criterios (en forma relativa):

- Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea: flujos regionales presentan alta T y CE, Eh reductor, bajo OD y pH alcalino.
- Indicadores químicos del agua subterránea: flujos regionales presentan concentraciones de $\text{HCO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{Cl}^-$, altos contenidos de STD y Li^+ .
- Indicadores ambientales: los flujos regionales se manifiestan en manantiales y cuerpos de agua termales y salinos, con actividad permanente, dando lugar a suelos salinos y más alcalinos, con vegetación freatófita y halófila.

Las evidencias fisicoquímicas (baja T y CE; alto OD; pH neutro-ligeramente ácido) e hidrogeoquímicas (predominio de HCO_3^- , bajas concentraciones de STD, Cl^- y Li^+) encontradas en este trabajo apuntan a flujos de reciente infiltración, con un tiempo de residencia corto en el subsuelo, que en conjunto integran un sistema de flujos locales. Dentro de este sistema existen variaciones de T, CE, Eh y concentración de HCO_3^- vs SO_4^{2-} , que indican diferentes condiciones de circulación y grados de interacción agua-roca, pero que no representan grandes contrastes como para definir un sistema intermedio o regional. Los flujos más someros del sistema local (profundidad <50 m) se hayan agotados, mientras que los de mayor profundidad aún persisten.

Las evidencias ambientales de carácter local del agua subterránea en Petorca son: a) presencia de vegetación freatófita, ausencia de manantiales termales, de suelos salinos y de vegetación halófila; b) estrecha relación entre la variabilidad climática y la actividad (estacional) y caudal (disminuido) de los flujos.

La composición química del agua estudiada es resultado del intemperismo de las rocas presentes, esencialmente andesitas, granitoides y calizas. Esta interacción está limitada por el corto tiempo de residencia del agua en ambiente subterráneo. Además, se sugiere la participación de: a) Flujos de retorno por riego agrícola (aumento de iones disueltos en el agua). b) Sulfuros (depósitos hidrotermales), que liberan SO_4^{2-} y Fe_3^+ y alteran el pH y el Eh.

A juzgar por la composición isotópica ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), los flujos locales se originan en tres zonas dentro de la cuenca de Petorca, diferenciadas por su elevación y clima. Estos flujos viajan a través de (a) rocas intrusivas y secuencias volcano-sedimentarias (movimiento favorecido por fallas y fracturas), y (b) depósitos fluvio-aluviales, que rellenan los valles. La descarga de estos flujos se produce en ríos y manantiales dentro de la misma cuenca, luego de trayectos relativamente cortos y someros. Desde una perspectiva regional, se infiere que los flujos regionales (no identificados en la zona estudiada) se originan en el parteaguas andino, dirigiéndose hacia el Oeste y descargando en el sector costero (Longotoma) o incluso bajo el mar (Fig 1).

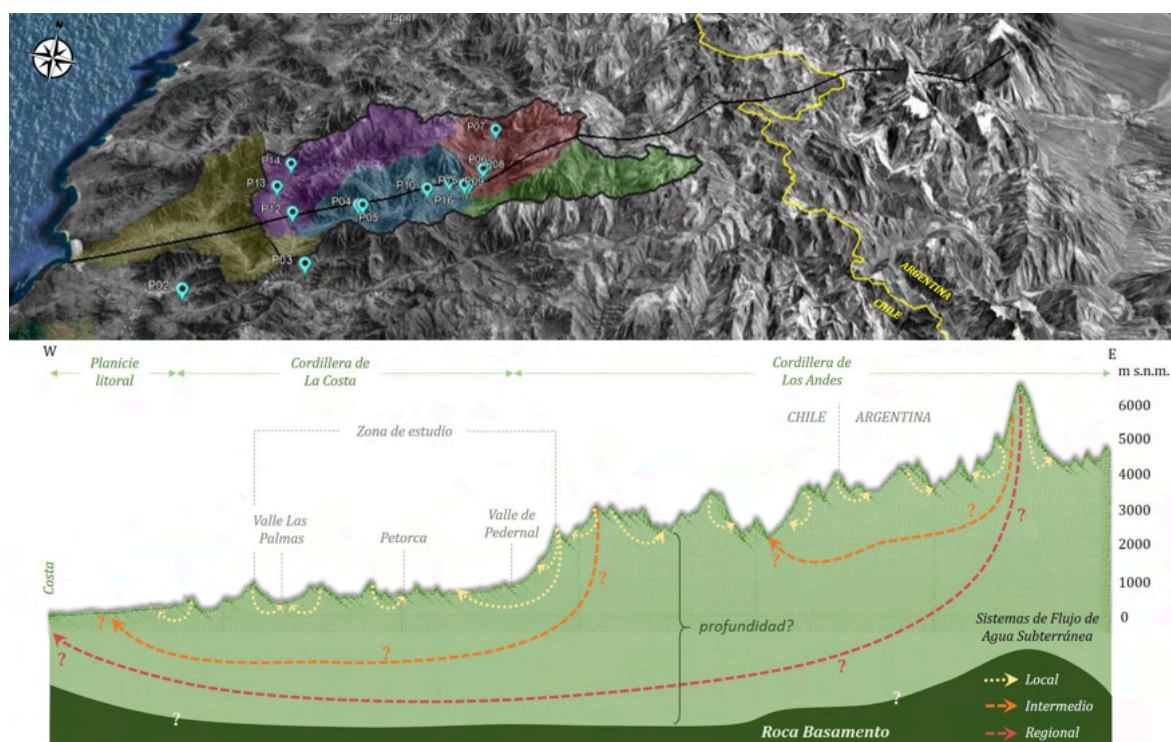


Figura. 1. Esquema hipotético de los sistemas de flujo de agua subterránea, distribuidos en un perfil trazado desde el punto más elevado en la cordillera andina, pasando por la cuenca del Río Petorca, hasta su desembocadura en las costas del Pacífico (cota 0). Elaboración propia.

5. Contaminación del agua subterránea

El agua estudiada presenta contaminación en ciertos puntos de extracción, por la presencia de SO_4 , NO_3 , Mo y Mn sobre los límites de la Norma Chilena Oficial, representando un riesgo para la salud de la población. Altas concentraciones de SO_4 y NO_3 derivan de procesos orgánicos (desechos orgánicos, aguas residuales, descomposición de materia orgánica) y/o químicos (residuos industriales, fertilizantes). Los contenidos anómalos de SO_4 pueden indicar también contaminación por lixiviados mineros, consistente con los valores encontrados de Mo y Mn, y cercanía a relaves carentes de aislamiento. En consecuencia, se evidencia la afectación de la calidad del agua subterránea por el deficiente manejo de desechos mineros, agrícolas y domiciliarios en la comuna de Petorca.

6. Discusión

Al revisar las bases teóricas-metodológicas del modelo de gestión del agua en Chile y Petorca, se cuestiona lo siguiente:

A) Desconocimiento u omisión del agua subterránea

La normativa del agua y los estudios hidrológicos, en general, no le dan significativa importancia al agua subterránea; la atención está puesta sobre el agua superficial. Peor aún, se separa el agua superficial de la subterránea. Existen significativas diferencias entre la información asequible del agua en su fase superficial v/s subterránea; para esta última se cuenta con escasos recursos y profesionales expertos. Numerosas zonas del territorio nacional carecen de estudios hidrogeológicos o presentan información francamente deficiente y/o desactualizada. Por otro lado, el desconocimiento sobre el funcionamiento del agua subterránea y su rol como agente geológico, repercute en una deficiente planificación y gestión territorial, ya que la dinámica subterránea suele estar involucrada directamente en eventos como inundaciones, deslizamientos de laderas e inestabilidad de suelos.

B) Acuífero: unidad de estudio y de administración del agua subterránea

Acuífero es una “formación geológica que almacena agua” (Price, 2007). Las propiedades, geometría y distribución (natural) del agua en el subsuelo responden a condiciones principalmente geológicas. Sin embargo, la frontera entre un acuífero y otro no guarda ninguna relación con la distribución de las formaciones geológicas. En su lugar, los acuíferos en Chile son definidos por criterios administrativos o de la hidrología superficial (cuencas), segmentando arbitrariamente territorios formados por las mismas unidades geológicas. Además, cada acuífero es evaluado como una entidad aislada e hidráulicamente inconexa de los acuíferos vecinos, y se formulan modelos con base en supuestos irreales, como: fronteras del dominio con nula permeabilidad o de carga constante; medios geológicos homogéneos y/o isotrópicos; propiedades constantes del agua subterránea (densidad, temperatura); métodos estadísticos erradamente aplicados.

Desde el punto de vista de los SFAS, un “acuífero” abarca la parte somera del sistema hidrogeológico, donde sólo se hallan flujos locales. Ello impide tener una visión completa del sistema, y reconocer la interacción entre los diferentes SFAS (componente vertical) y la posible influencia de flujos más profundos, que se excluyen de las modelaciones. En el caso de estudio, según la literatura, el “Acuífero Río Petorca” está formado por depósitos fluvio-aluviales que rellenan los fondos de los valles. ¿Y qué hay del resto de las rocas que componen la cuenca? ¿Por qué fueron excluidas, si sus propiedades litológicas y condiciones de fracturamiento propician perfectamente la circulación de agua a través de ellas? Así lo demuestra la descarga de abundante agua en zonas altas, donde no existen tales depósitos fluvio-aluviales a los que se supone que se restringe el acuífero.

Por otro lado, los límites del Acuífero Río Petorca corresponden a los límites de la cuenca homónima. Los modelos conceptuales consideran como fronteras impermeables a las laderas de los valles y la roca consolidada que infrayace bajo estos depósitos, malentendido como el “basamento” del acuífero. Este “basamento” corresponde en realidad a las formaciones volcánico-sedimentarias cretácicas, y en ningún caso se condice con el basamento de los SFAS, el cual estaría conformado por rocas pre-cretácicas, ubicadas a una profundidad considerablemente mayor. Por tanto, cuando se habla del “Acuífero Río Petorca” se hace referencia a la parte somera del sistema de flujos locales que transitan bajo los fondos de los valles. Esta aproximación deja fuera al agua subterránea que circula por el resto de los materiales geológicos, ubicados a mayor profundidad y fuera de las fronteras de los lechos fluviales.

Por los motivos expuestos, se sugiere repensar y redefinir el concepto “acuífero”, para que pueda representar con mayor fidelidad al sistema hidrogeológico y prestar mayor utilidad en los estudios y administración del agua subterránea.

C) Balance Hidrológico (BH): es adecuado para estudiar y administrar el agua subterránea?

El BH deriva de la hidrología superficial, que supone que en una cuenca cerrada, para un espacio y tiempo definido, se cumple el principio de conservación de masas: *Variación en el almacenamiento de la cuenca = Entradas – Salidas*. Las “Entradas” son los aportes por precipitación, y las “Salidas” son los caudales liberados por evapotranspiración y escorrentía. Si las condiciones de la cuenca son las mismas al inicio y al final, se cumple que: *Volumen total de Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía*. Notar que se debe cumplir que la infiltración sea uniforme en el tiempo, lo cual es a todas luces irreal.

Erradamente, la hidrología subterránea introdujo esta ecuación para evaluar el volumen de agua almacenada en un determinado acuífero. Esto representa una contradicción por los motivos expuestos anteriormente, y porque el medio subterráneo no es un sistema cerrado. Por otro lado, se observa una grave inconsistencia respecto al tiempo en el que se evalúa el BH vs el tiempo de infiltración y circulación del agua a través de las rocas (desde días a miles de años). El BH se establece a partir de tasas anuales de recarga, tiempo absurdamente despreciable frente a las escalas de tiempo de circulación del agua subterránea.

La ecuación del BH para un acuífero comprende las siguientes variables: A) Entradas: precipitaciones (recarga), aporte de agua superficial y de “acuíferos adyacentes”. B) Salidas: evapotranspiración, descarga en cuerpos de agua y “acuíferos adyacentes”, y extracción en pozos. A excepción del caudal de entrada y salida medido en cuerpos superficiales, el resto de las variables son calculadas o estimadas. Cómo estimar el caudal de salida por extracción en pozos, si no existe un control efectivo por parte de la DGA? ¿Cómo cuantificar el agua extraída en pozos ilegales? Cuáles son los límites y propiedades del acuífero en cuestión y de los acuíferos adyacentes? Con base en qué distribución de estaciones meteorológicas se genera la interpolación estadística de los datos de precipitación? No existe una certeza aceptable, por tanto, los modelos y simulaciones de escenarios de “disponibilidad hídrica” son inciertos. Este es el referente metodológico sobre el cual se basan las políticas públicas y la administración del agua en el país, incluyendo la declaración de zonas de restricción y prohibición.

Cabe notar que la DGA, al definir la “disponibilidad de un acuífero”, sólo considera la cantidad de agua supuestamente almacenada en un determinado acuífero, sin importar si es apta para el consumo humano. Por ello, se sugiere que la determinación de “disponibilidad” del agua para diferentes usos, considere su cantidad así como su calidad química, bacteriológica y radiactiva.

7. Conclusiones

En la parte media-alta de la cuenca de Petorca se manifiestan flujos de agua subterránea de reciente infiltración, someros y de corta trayectoria, que conforman un sistema local. No se encontró evidencia de la presencia de flujos intermedios ni regionales; de los últimos se infiere su origen en la alta cordillera andina y su descarga en la costa del Pacífico (Fig. 1).

Respecto a los cuestionamientos al modelo de gestión de agua, desde un punto de vista hidrogeológico, se concluye que:

- Existe un desconocimiento sobre el agua subterránea, su relación con el ambiente y su rol como agente geológico, lo cual conlleva a una inadecuada gestión y uso del agua, y deficientes planes de gestión territorial.
- La unidad de estudio y de administración del agua subterránea (el acuífero) presenta inconsistencias por: a) la definición de sus límites, ya que responde a criterios administrativos y no hidrogeológicos; b) su evaluación como una entidad aislada e hidráulicamente inconexa de los acuíferos vecinos; c) los supuestos irreales en la formulación de modelos: fronteras del dominio con nula permeabilidad o de carga constante, medios geológicos homogéneos y/o isotrópicos, propiedades constantes del agua subterránea (densidad, temperatura), y aplicación de métodos estadísticos errados.

- La evaluación del agua subterránea se basa en el Balance Hidrológico, cuya aplicación es inconsistente porque: a) supone que un acuífero es un sistema hidráulicamente cerrado; b) su cálculo se basa en variables estimadas (no medidas), destaca el desconocimiento de caudales efectivamente extraídos; c) considera escalas de tiempo inconsistentes con los procesos de recarga y tránsito de los diferentes flujos subterráneos.
- La “disponibilidad de un acuífero” sólo considera la cantidad de agua, descuidando su calidad, lo cual limita notablemente su uso y supone riesgos para la salud humana.

Se recomienda considerar en los planes y estrategias territoriales de Petorca el estudio del agua subterránea con la visión de los SFAS, ya que proporciona el enfoque más actualizado e integral sobre el funcionamiento del agua subterránea. El caso de Petorca es crítico porque su población y ecosistemas dependen exclusivamente de flujos locales, los más susceptibles a ser afectados (en su calidad, volumen y dinámica) por disturbios superficiales (naturales o antrópicos). Si la actual tendencia de abatimiento de los niveles de agua no se revierte, pronto la población se verá forzada a acudir a los flujos intermedios para satisfacer sus requerimientos de agua. Esto implicaría profundizar los pozos y extraer agua con importantes cambios en su calidad y propiedades: los flujos intermedios presentan, en relación con los flujos locales, una mayor T y salinidad, pH más alcalino, Eh reductor, mayor CE, menor contenido de OD, y mayor proporción de SO₄²⁻ y Cl⁻ vs HCO₃⁻.

En vista de los adversos escenarios climáticos futuros, es urgente mejorar la forma en que se utiliza y reparte el agua, si lo que se busca es asegurar su permanencia para el desarrollo digno de las(os) habitantes de Petorca y la preservación de sus ecosistemas.

Palabras Clave: sistemas de flujo agua subterránea, Petorca.

Financiamiento: Este proyecto se concretó gracias al apoyo económico de diversas fuentes: (1) Beca CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), otorgada por el Gobierno Federal Mexicano. (2) Beca Atlántida Coll, entregado por el Instituto de Geografía de la UNAM, gracias a las gestiones y apoyo de Naxhelli Ruiz y Penélope Márquez. (3) Los análisis químicos fueron financiados por Marisol Vivanco. (4) Los análisis isotópicos fueron financiados por el Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello (UNAB), Viña del Mar, Chile, gracias a la gestión de Justinne Rybertt y Francisco Fernandoy.

Agradecimientos: El estudio fue posible gracias a la guía del Dr. Joel Carrillo, y a la colaboración en campo de Enrique Benavides, Marxel De la Fuente, Karen Baraona, Pablo Verger, Vladimir Vicencio y Álvaro Escobar.

Referencias:

- Carmona, C., Carrillo-Rivera, J., Hatch, G., Huizar, R. y Ortega, M. 2017. Ley del Agua Subterránea: una propuesta. UNAM, México. ISBN: 978-607-02-8997-2. DOI: <http://dx.doi.org/10.14350/sc.04>.
- Carrillo-Rivera, J. y Cardona, A. 2012. Groundwater Flow Systems and Their Response to Climate Change: A Need for a Water-System View Approach, American Journal of Environmental Sciences, V8, 220-235 p.
- Levi, B. 1970. Burial metamorphic episodes in the Andean Geosyncline, Central Chile. Geologische Rundschau, Vol. 59, p 994–1013.
- Tóth, J. 1963. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of Geophysical Research, V68, pp. 4795-4812.

Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago, Chile. Lecciones aprendidas después de dos años de operación

Karina De Requesens Montiel¹, Amparo Edwards¹, Linda Daniele²⁻³, Matías Taucare²⁻³, José Luis Fuentes⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(3) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(4) Sociedad de Canalistas del Maipo, Nueva de Lyon 72, Of. 1401, Providencia, Santiago, Chile

La disponibilidad del agua se ha visto afectada negativamente debido al cambio climático (Sadoff & Muller, 2010). En particular, Chile enfrenta un escenario de sequía con un déficit de precipitaciones del 25% al 45% y aumentos en la temperatura media que van de 0,5°C a 1°C (Garreaud et al., 2020; Vuille et al., 2015). Además, el crecimiento demográfico y su consecuente desarrollo económico trae consigo un aumento de la demanda de este recurso.

Ante este escenario, el gobierno de Chile ha anunciado diversos planes estratégicos para afrontar la escasez hídrica, dentro de las cuales se encuentra el uso de la recarga gestionada de acuíferos (RGA). La RGA permite el almacenamiento subterráneo de agua con efectos económicos y pérdidas por evaporación prácticamente nulas (Dillon et al., 2019). Esta técnica cuenta con gran versatilidad, ya que sus métodos son adaptables a la hidrología e hidrogeología local. A pesar de lo mencionado, la documentación de esta tecnología en el país es escasa y, además, existen barreras normativas para su implementación (Rojas Calderón, 2019).

El objetivo de este trabajo se orienta a disminuir la incertidumbre en el uso de esta tecnología y, así, motivar el desarrollo de estos proyectos. Para lograrlo, se analiza un proyecto piloto de RGA realizado por la Sociedad de Canalistas del Maipo, el cual consistió en la construcción de dos sistemas de RGA en el campus Antumapu (La Pintana, Chile). Esta experiencia contó con un exhaustivo plan de monitoreo, y su operación se realizó durante los años 2016 y 2017.

Particularmente, este estudio analiza la operación de las piscinas de infiltración, cuyo diseño consta de una planta de tratamiento primario (PT) y dos piscinas con operación cíclica. La experiencia cuenta con datos de estratigrafía, que revela la presencia de una capa de arcilla debajo de la plata, monitoreo geofísico y registros de datos, continuos y manuales, de niveles superficiales de piscinas, aforadores y de niveles subterráneos. Los datos continuos fueron corregidos a partir de los datos manuales y representados gráficamente en series de tiempo; luego, fueron analizados por períodos acotados al funcionamiento de cada piscina de infiltración. Además, se contó con datos de turbiedad, que se analizaron minuciosamente debido a su influencia en la colmatación de las piscinas.

La experiencia logró infiltrar 780.000 m³ de agua, con pérdidas por evaporación del 0,25% y sin una disminución en la capacidad de infiltración de las piscinas. Además, la PT tuvo una eficiencia de remoción del 50%, con turbiedades medias finales de 120 NTU. La capa de arcilla resultó no ser del todo restrictiva, con variaciones espaciales de sus propiedades hidráulicas, lo cual implicó la formación de montículos de entre 4 m y 6 m de altura y de hasta 200 m de extensión lateral. Se identificaron errores sistemáticos importantes en las estimaciones de los caudales. Pese a contar con puntos a mejorar, se concluye que la experiencia analizada fue capaz de poner a prueba una metodología de operación y monitoreo de una planta piloto de RGA de manera exitosa. Por esta razón, se divulgan y ponen a disposición pública los datos utilizados en este estudio.

Con la publicación de los datos en bruto de esta experiencia se espera cumplir con el objetivo de dar el primer paso a disminuir la incertidumbre en esta materia. Además, se recalca que, con la difusión de resultados de este y otros proyectos piloto realizados, y con el consecuente aumento del conocimiento técnico y operacional, es posible avanzar hacia la implementación masiva y a gran escala de esta tecnología. En otras partes del mundo se ha demostrado que los esquemas de RGA son exitosos, aceptados socialmente y económicamente viables, incluso más que las tecnologías que actualmente usa el país, como la desalación y almacenamiento de agua a través de embalses (Alam et al., 2021; Dillon et al., 2019; Zhang et al., 2020). Los tecnicismos legales se escapan de los alcances de este estudio; sin embargo, es muy importante mencionar que, sin una legislación y normativa clara, que evalúe los impactos ambientales de estos proyectos y permita el uso del agua para la recarga y su posterior extracción, es muy difícil motivar grandes inversiones en estos proyectos.

Palabras Clave: Recarga gestionada de acuíferos, Gestión de recursos hídricos, Planta piloto, Aguas subterráneas

Agradecimientos: Se agradece a la Sociedad de Canalistas del Maipo por su disposición a proporcionar y publicar los datos utilizados en este estudio.

Referencias:

- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., & Mohanty, S. K. (2021). Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. *Science of The Total Environment*, 768, 144992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>.
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Luria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., ... Sapiano, M. (2019a). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- Rojas Calderón, C. (2019). Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA). Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia. *Ius et Praxis*, 25(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-00122019000200151>.
- Sadoff, C., & Muller, M. (2010). La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales. *Global Water Partnership*.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research*, 120(9), 3745–3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>.
- Zhang, H., Xu, Y., & Kanyerere, T. (2020). A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. In *Physics and Chemistry of the Earth (Vols. 118–119)*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>.

Comparación de softwares de modelación numérica de aguas subterráneas en minería a cielo abierto: Aplicado al Rajo Los Bronces

Kimberlyn Demierres¹, Alejandro Bordeu Ossa¹, Linda Daniele², Martin Brown³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología-CEGA-CAPTA, FCFM, Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Itasca

La modelación numérica de aguas subterráneas se ha vuelto fundamental para la toma de decisiones respecto al manejo y control de los recursos hídricos en diferentes campos, incluyendo la minería a cielo abierto. Hay varios softwares disponibles en el mercado para modelar el desaguado de un rajo, y la elección de uno u otro depende tanto de las características del estudio como de las necesidades del usuario. Este trabajo compara tres softwares de modelación numérica de aguas subterráneas (Groundwater Vistas, FEFLOW, MINEDW) en términos de su aplicación a un caso real de minería chilena en el rajo Los Bronces. Se construyó el mismo modelo en cada software y se calibró manualmente en régimen estacionario, evaluando 7 criterios, incluyendo entre ellos la capacidad de simulación y la complejidad de la interfaz.

Los resultados muestran que todos los softwares permiten modelar el rajo, pero presentan diferentes procesos de implementación de variables y disponibilidad de menús específicos que se traducen en amplias diferencias en el tiempo de construcción del modelo. En términos generales, MINEDW es el software más adecuado por facilidad de construcción y optimización del tiempo invertido, aunque se debe tener precaución con su condición de admisibilidad de recarga. Groundwater Vistas o FEFLOW son mejores opciones para el postproceso y la comprensión más profunda del acuífero, aunque el tiempo de construcción del modelo puede ser varias veces mayor que MINEDW. Existen otras variables ajenas a los softwares que influirán también en la decisión, tal como por ejemplo el software utilizado en un modelo antecedente.

En conclusión, la selección de un software para modelar un rajo debe hacerse según el objetivo del modelo, las características a representar y las limitaciones propias del estudio, así como también en consideración a los modelos previamente realizados. Este estudio proporciona información útil sobre las ventajas y limitaciones comparativas de tres softwares para modelar el agua subterránea en un rajo, brindando orientación a los usuarios e investigadores que buscan modelar escenarios similares.

Palabras Clave: modelación numérica de aguas subterráneas, Groundwater Vistas, FEFLOW, MINEDW, minería a cielo abierto.

Agradecimientos: Environmental Simulations Inc, DHI Group, Itasca Chile, Seequent y Aquaveo.

Aplicación de métodos geofísicos a la caracterización hidrológica de la cuenca del Jardín Botánico de Viña del Mar

Borja Farah Celis¹, Daniel Díaz¹, Juvenal Letelier²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile
(2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

En el contexto de mega sequía en la zona central [1], delimitar los recursos de agua subterránea y minimizar el costo e impactos asociados a esto, aparece como una necesidad a nivel nacional. La geofísica ha surgido durante las últimas décadas como una manera de complementar las observaciones directas de agua subterránea (eg. pozos) [2]. Dos de las propiedades físicas de interés al estudiar medios hidrogeológicos son la resistividad eléctrica y la densidad. La resistividad eléctrica contiene información sobre el contenido de agua del subsuelo [3], mientras que la densidad contiene información sobre la porosidad del medio [4], ya sea primaria o secundaria.

Esta investigación consiste en la aplicación de las metodologías (1) transiente electromagnético (TEM), (2) tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y (3) gravimetría, con el objetivo de caracterizar el agua subterránea de la cuenca donde se ubica el Jardín Botánico de Viña del Mar (JBVM). La cuenca del JBVM se presenta como una cuenca de particular interés por una serie de razones: es una cuenca de tamaño relativamente pequeño (7.5 km² de área), tiene una infraestructura para la carga y descarga de una laguna artificial ubicada dentro del jardín, posee un estero que corre todo el año, y ha tenido una serie de eventos de contaminación por aguas servidas provenientes de una planta de ESVAL ubicada aguas arriba del JBVM. En el área se cuenta con el antecedente de un solo pozo ubicado a la salida de la cuenca, que presenta un nivel freático de 5.4 m, medido en mayo del 2022. Además, en un informe técnico realizado en septiembre del 2020, se midió la conductividad eléctrica del agua en tres puntos de la cuenca, obteniendo los siguientes valores: 1219, 864 y 876 $\mu\text{S}/\text{cm}$; información que permitirá complementar los modelos propuestos.

Para este trabajo, se realizaron 10 perfiles de ERT, 8 estaciones de TEM y 60 mediciones gravimétricas en la zona de estudio. Las mediciones de ERT fueron obtenidas en perfiles de diferente longitud, entre 24 y 240 metros, usando arreglos Schlumberger y Dipolo-Dipolo. Las mediciones de TEM fueron adquiridas con arreglos de cuadrados concéntricos, con tamaños de 40 x 40 y 20 x 20 m². Las observaciones de ERT y TEM fueron invertidas para obtener modelos de resistividad real a partir de las pseudosecciones de resistividad aparente. Las mediciones gravimétricas fueron analizadas de manera cualitativa y de manera cuantitativa a partir de modelos 2D tipo *forward*.

Los métodos ERT y TEM muestran una disminución de resistividad eléctrica hasta los 10 metros de profundidad. Sin embargo, los valores observados de resistividad varían considerablemente entre métodos. Esto se puede deber a las diferencias en los mecanismos físicos de medición [5]. A partir de un perfil de ERT medido cercano al pozo, se pudo definir la resistividad del medio hidrogeológico como 173 Ωm . La anomalía gravimétrica calculada varía entre -1 y 1 miligal, y en términos generales se distribuye con una anomalía positiva hacia el norte y una anomalía negativa hacia el sur. En cuanto a los modelos obtenidos, el nivel freático calculado varía entre 1 y 6 metros de profundidad, presentando los menores valores en la parte alta y centro de la cuenca. El espesor sedimentario varía entre 5 y 150 metros aproximadamente. Se observan cuatro depocentros, tres de los cuales se ubican en torno al estero que fluye a través de la cuenca.

Aunque los resultados de TEM y ERT son en general compatibles, dos perfiles de ERT presentaron resistividades demasiado bajas en comparación, siendo imposible estimar el nivel freático a partir de ellos. Los resultados de TEM y gravimetría también son coherentes entre sí, observando resistividades sobre 1000 Ωm en las zonas donde se infirió presencia de cuerpos intrusivos a partir de la gravimetría. Por otro lado, las estaciones de TEM muestran aumentos a resistividades del orden de 100 Ωm dentro de la capa de sedimento inferida, esta variación de resistividad aún no tiene una interpretación geológica.

Palabras Clave: hidrogeofísica, TEM, gravimetría, ERT.

Financiamiento: Este trabajo es financiado por el Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA) y el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Agradecimientos: Los autores de este trabajo agradecen al Centro Avanzado para Tecnologías del Agua, al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y al Núcleo de Geofísica Aplicada.

Referencias:

- [1] Garreaud, R. D. x, Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.
- [2] Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Revil, A., Robinson, D. A., Singha, K., & Slater, L. D. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water resources research*, 51(6), 3837-3866.
- [3] Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62.
- [4] Carmichael, R. S. (2017). *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals* (1988). CRC press.
- [5] Auken, E., Pellerin, L., Christensen, N. B., & Sørensen, K. (2006). A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, 71(5), G249-G260.

Treatment and reuse wastewater: A sustainable strategy for water resource use

Catalina Ferrada Villanueva¹⁻², Ignacio Vega Alay², María José Bravo¹, Felipe Riquelme¹, Nelson García¹

(1) ENVIS SpA., Geociencias, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales, Concepción, Chile

Introduction

Since 2010 to the present, there has been a considerable increase in the processing of non-conventional renewable energy (NCRE) projects in northern Chile. The arid conditions of the Atacama Desert, the high wind potential and high radiation levels provide the appropriate conditions for wind and solar power plants.

During the environmental assessment and processing of a wind farm located near the Salar de Navidad, Antofagasta Region, infiltration coefficients for the installation of wastewater treatment plants (WWTP) were determined. However, the physical and chemical conditions of the substrate are not optimal for the discharge of wastewater required by environmental regulations (Article 138 RSEIA / DS N°40 2012). The substrate is highly compacted and cemented by poorly soluble salts, which generates an impermeable slab unable to infiltrate water through drain fields.

Based on this, a sustainable solution to the water management of the project is proposed, based on a continuous and closed recirculation system of treated water in WWTPs.

Methodology

The methodology was carried out according to the necessities of the client and the conditions of the project location area. Subsequently, the following stages were carried out:

Field data collection: A soil pit campaign and infiltration trials were carried out to determine the infiltration coefficients of the substrate.

Systematization of information: The production of wastewater was calculated according to the staffing with a recovery coefficient of 90% of the WWTP and a hydric balance considering a continuous and closed recirculation system to make use of the treated water was carried out.

Finally, a sustainable solution of the wastewater is proposed, meeting the sanitary requirements stated in the current environmental regulation.

Results and Conclusions

In the context of the environmental assessment of a project, it is necessary to foresee the potential impacts and to propose mitigation measures. Generally, during the construction phase of a project, site facilities (SF) are required to cover the basic needs of the personnel.

During the construction phase, the use of a wastewater treatment plant (WWTP) contemplated the average and peak staffing, for 190 and 340 people, respectively. According to the water balance, the WWTP is expected to generate an average of 25.7 m³/day of treated water and a maximum of 45.9 m³/day.

To comply with the sanitary and environmental regulations, the implementation of a storage system with five tanks of 32000 liters for treated water with an autonomy of three days was proposed. The system would comprise water level sensors at 80% and air diffusers that allow to maintain the water quality under the NCh 1333/1978 and to comply with D.S. N°236/1926. Subsequently, the stored water will be reused in the production of concrete and in moistening roads.

The concrete plant plans to use 10,000 m³ of water in its production process for the generation of concrete and 9,000 m³ of water for washing canoes and mixer trucks, where 100% of the water treated by the WWTPs will be reused during the construction phase.

This proposal was approved by the authority in the Environmental Qualification Resolutions (RCA N°202202001211) and has the advantage of being applicable to any project in similar conditions or for those projects that seek sustainable strategies for water management. It is emphasized that this proposal allows the prevention of environmental impacts, avoiding the contamination of aquifers due to the discharge of wastewater and proves that it is possible to efficiently manage the water resource in arid environments where water is not an abundant resource.

Keywords: Hydrogeology, Sustainability, Reuse, Wastewater.

Acknowledgments: This thanks is extended to ENVIS SpA. for promoting the development of science and innovation.

Simulación de la movilización y especiación de arsénico en acuíferos de uso compartido mediante modelos de transporte reactivo

Martin González Rivera¹, Linda Daniele¹⁻², Laura Scheiber³, Magalí E. Carro Pérez⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Grupo de Hidrología Subterránea, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), España

(4) Universidad Nacional de Córdoba - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (CONICET), Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611 - Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

El arsénico es un metaloide natural, conocido como uno de los contaminantes más tóxicos presentes en las aguas subterráneas. Es posible encontrarlo en minerales como el realgar o la arsenolita, y se encuentra en la naturaleza por procesos naturales; o bien, por actividades antrópicas, como la fundición de metales (Litter et al., 2019). Los compuestos de arsénico más conocidos son el arseniato y arsenito (Hughes, 2002). El arsenito (As (III)) corresponde al más tóxico y se presenta en ambientes reductores mientras que el arseniato (As (V)) se presenta en ambientes oxidantes (Bocanegra et al., 2002).

En América Latina, se han identificado concentraciones elevadas de arsénico en las aguas subterráneas en al menos 14 países, entre ellos Argentina, Bolivia, Chile (Bundschuh et al., 2012). En la mayoría de estos países, el arsénico está asociado a un origen geogénico debido al volcanismo en los Andes.

En acuíferos de uso compartido (suministro, riego y/o industria), la implementación de proyectos de climatización mediante uso directo de la geotermia somera puede generar preocupación por eventuales modificaciones en la calidad del agua como consecuencia de cambios en las temperaturas del acuífero. Chile y Argentina, presentan potencial para generar energía geotérmica en los primeros 400 metros de profundidad desde la superficie. La geotermia somera está siempre más presente en las agendas energéticas de los países ya que es un recurso de base, ubicuo, local (no tiene que ser comprado a países terceros), limpio y renovable que podría contribuir significativamente a mejorar la calidad del aire y ayudar a la descarbonización, especialmente de las grandes ciudades. La gestión de los recursos es un gran desafío para la economía mundial considerando que tanto la demanda como el consumo de energía aumentan con el crecimiento de las grandes urbes (Vargas et al., 2022).

Considerando todo lo anterior, el principal objetivo de este trabajo es estudiar mediante modelos de transporte reactivo, cómo proyectos de uso directo en acuíferos someros de uso compartido pueden afectar la calidad de las aguas, generando cambios que podrían inducir la movilidad de elementos potencialmente tóxicos, especialmente del arsénico. Para evaluar los cambios en la especiación y movilidad, se han implementado dos escenarios de simulación. El primero consiste en generar cambios de temperatura en un sistema con parámetros hidráulicos y mineralógicos establecidos considerando un sistema poroso y litología común a los sedimentos que conforman acuíferos en Chile central. Se define una porosidad del 15%, simulando un sistema compuesto por sedimentos tamaño arena fina y arena limosa, con un flujo permanente unidireccional de 4 m/año. Este escenario contempla tanto el aumento como la disminución de la temperatura. Las variaciones se realizan de forma manual cada 5°C entre los 15°C y 30°C. El segundo escenario agrega las operaciones de inyección y bombeo al sistema del primero, con caudales de 1,5 l/s.

Los resultados del primer escenario muestran que las especies de As (V) predominan frente a las especies de As (III) debido principalmente al control de las condiciones redox y el pH. El As (III) presenta, en la mayoría de las veces, una correlación directa con la temperatura. El As (V) varía de manera independiente a la temperatura, con variaciones que en realidad se mantienen en los mismos órdenes de magnitud. Por otro lado, la Goethita y la Hematita, presentan un comportamiento estable bajo las condiciones en las que se desarrollan las simulaciones. Esto es importante, pues los óxidos de hierro cumplen un rol fundamental en la retención e inmovilización del arsénico. Los resultados del segundo escenario indican que durante el bombeo e inyección se tienen pautas diferentes. Durante la inyección todas las especies de arsénico aumentan sus concentraciones en el tiempo, generando una pluma alargada en la dirección del flujo.

De las simulaciones realizadas, se concluye que la temperatura puede afectar a las concentraciones de As (III), pero que van a ser las condiciones redox y de pH las que van a determinar cuánto As (III) habrá en el sistema. Si bien en algunos casos se observa que las variaciones en la temperatura pueden generar aumentos en las concentraciones, estas se mantienen en los mismos órdenes de magnitud, por lo que la implementación de la geotermia somera es viable, pues los impactos son mínimos. Estos resultados preliminares sugieren que el uso de sistemas cerrados podría tener menos impactos debido a la pluma que se forma durante la inyección. Finalmente queda por simular con mayor detalle el proceso de inyección ya que podrían verse afectadas las condiciones redox del sistema, que regulan la movilidad no solo del arsénico sino de otros metales.

Palabras Clave: Arsénico, Modelos de transporte reactivo, CrunchFlow, Geotermia somera.

Financiamiento: Este trabajo es una contribución al Proyecto ATE220029 "The water-energy-food nexus for urban areas in central Chile (wef-Chile)" financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) en el concurso Anillo de Investigación en Áreas Temáticas Específicas 2022; y al Proyecto CYTED Red719RT0585 Red Iberoamericana de Geotermia Somera (RIGS).

Referencias:

- Bocanegra, O., Bocanegra, E., & Álvarez, A. (2002). Arsénico en aguas subterráneas: su impacto en la salud. *Groundwater and Human Development*.
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. S., Liu, C. W., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R. G., Cuevas, A. G., Cornejo, L., Cumbal, L., & Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>.
- Hughes, M. F. (2002). Arsenic toxicity and potential mechanisms of action. *Toxicology Letters*, 133(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00084-X).
- Litter, M. I., Ingallinella, A. M., Olmos, V., Savio, M., Difeo, G., Botto, L., Farfán Torres, E. M., Taylor, S., Frangie, S., Herkovits, J., Schalamuk, I., González, M. J., Berardozi, E., García Einschlag, F. S., Bhattacharya, P., & Ahmad, A. (2019). Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment*, 676, 756–766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262>.
- Vargas, C. A., Caracciolo, L., & Ball, P. J. (2022). Geothermal energy as a means to decarbonize the energy mix of megacities. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00386-w>.

Análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico de la microcuenca precordillerana Laguna Amargo de la región del Maule, Chile

Ariel Gutiérrez¹, Nicolás Morales², Rodrigo Muñoz¹, Francisco Fernandoy², Roberto Urrutia⁴, Denisse Álvarez³⁻⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Grupo de Hidrología Subterránea, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), España

(4) Universidad Nacional de Córdoba - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (CONICET), Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611 - Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

El déficit de precipitaciones en la zona central de Chile está afectando no sólo a los sistemas hidrológicos superficiales, sino también a las recargas de acuíferos aluviales, que en un mediano plazo podrían hacer más susceptibles a la desecación, a los sistemas lacustres y fluviales que son la principal fuente de agua en la zona (Barriá et al. 2021, Herrera et al. 2023, Taucare et al. 2020). Aunque las condiciones climatológicas son relevantes, las características geológicas y la actividad antrópica son factores que influyen en la vulnerabilidad de estos sistemas acuáticos, por lo que es necesario entender el comportamiento de los sistemas hidrogeológicos, principalmente en áreas poco intervenidas para comprender las variaciones de los cuerpos de agua bajo el actual cambio climático. En esta investigación se utilizó la laguna Amargo como objeto de estudio, localizada al sureste de la VII región del Maule a 740 m s.n.m. y que se emplaza en depósitos aluviales, fluviales y rocas volcánoclasticas de la Formación Cura Mallín. La zona de estudio se encuentra dominada por litologías volcánicas, tobas y brechas volcánicas asociadas al cono volcánico Nevado de Longaví, en la zona precordillerana (Muñoz y Niemeyer, 1984). Estudios hidrogeológicos realizados por Taucare et al. (2020) indican que las estructuras en las zonas cordilleranas y precordilleranas de Chile Central tienen influencia sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneas, que, por medio de fracturas y fallas locales, permiten la transmisión del agua. De acuerdo con observaciones en terreno, anualmente la laguna presenta variaciones en el nivel de agua hasta 18 metros que estarían asociadas a la presencia de fallas y fracturas en la cuenca.

Se realizaron análisis isotópicos e hidroquímicos en diversos puntos de la laguna, sus afluentes y la precipitación. Se realizó un seguimiento de la precipitación durante un año y se analizó la composición isotópica mensual, encontrando valores que fluctuaron entre -9,8‰ a -3,9‰ para el $\delta^{18}O$ y -64,3‰ a -24,7‰ para δD . La señal isotópica de la laguna, aguas de vertiente y río se encuentran dentro del rango de variación de la precipitación, sugiriendo una importante contribución a todo el sistema hidrológico en la cuenca. Además, la cercanía de las señales isotópicas de las precipitaciones y vertientes evidenciaría un rápido recambio de las aguas subterráneas. Lo anterior es coherente con el análisis hidrogeoquímico, que indica una relación de las aguas de la zona de estudio - bicarbonatadas cálcicas; con aguas subterráneas. Las altas concentraciones de hierro y aluminio en la laguna con respecto a sus fuentes de agua superficiales y vertientes sugieren un aporte alóctono relevante de estos elementos al cuerpo de agua, debido a la meteorización de las rocas granodioríticas y la interacción con aguas subterráneas. Lo anterior, también se fundamenta por la presencia de SO_4 en las aguas de vertiente que presenta la mayor concentración, posiblemente por la interacción con los minerales de piritita de las granodioritas, y por las altas concentraciones de calcio y magnesio, debido a la disolución de las plagioclasas de este mismo intrusivo.

Finalmente, se definen 3 unidades hidrogeológicas de la microcuenca Laguna Amargo a partir de la geología local y rangos de parámetros hidráulicos estimados para cada una de ellas. El modelo conceptual hidrogeológico postula una recarga a un sistema subterráneo de un acuífero libre en periodos invernales por el aumento de las precipitaciones, que mantiene altos niveles en la laguna evidenciando que el nivel freático del acuífero también aumenta. La evidencia isotópica, hidrogeoquímica e hidrogeológica indican que las principales fuentes de agua de la Laguna Amargo son el volumen almacenado en el depósito aluvial - probablemente de corto tiempo de residencia - que aflora como escurrimientos superficiales y a través de las fracturas de la roca meteorizada. Estas fuentes tienen su recarga desde las precipitaciones del sector, lo que es sustentado por el balance de masa y la diferencia de flujo observada en periodos invernales (lluviosos) y estivales (secos). Por lo tanto, una disminución de las precipitaciones en la región podría generar efectos adversos significativos sobre estos sistemas lacustres y tener implicancias en las estimaciones de la recarga para el río Maule y sus usuarios.

Palabras Clave: Hidroquímica, Déficit hídrico, Hidrogeología, Isótopos estables, Hidrogeoquímica

Financiamiento: Proyecto Fondecyt de Iniciación N°11201231, CHIRAM ANID/FONDAP/15130015.

Referencias:

- Herrera, C., J. Urrutia, C. Gamboa, X. Salgado, L. Godfrey, A. Rivas, J. Jódar, E. Custodio, C. León, V. Sigl, K. Delgado, E. Arriagada. 2023. Evaluation of the impact of the intensive exploitation of groundwater and the mega-drought based on the hydrochemical and isotopic composition of the waters of the Chacabuco-Polpaico basin in central Chile. *Science of The Total Environment*. 165055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165055>.
- Barriá, P., C. Chadwick, A. Ocampo-Melgar, M. Galleguillos, R. Garreaud, R. Díaz- Vasconcellos, D. Poblete, E. Rubio-Álvarez, D. Poblete-Caballero. 2021. Water management or megadrought: what caused the Chilean Aculeo Lake drying? *Regional Environmental Change*. 21:19. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01750-w>.
- Muñoz, J., Niemeyer, H. 1984. Carta geológica de Chile N°64, Hoja Laguna del Maule 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Taucare, M., L. Daniele, B. Viguier, A. Vallejos, G. Arancibia. 2020. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of The Total Environment* 722: 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.

A novel interdisciplinary methodology to study the impact of geological constraints on the interaction between surface water and groundwater in mountain systems

Sarah Leray¹⁻², Etienne Marti¹⁻³, Daniela Villela⁴, José Maringue², Gonzalo Yáñez², Esteban Salazar⁴, Fernando Poblete⁵, Ronny Figueroa²⁻⁸, Jaime Araya Vargas²⁻⁷, Reynaldo Charrier⁵⁻⁶, Jorge Sanhueza²

- (1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago
(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Cambio Global UC, Santiago
(3) Sorbonne University, Paris, France
(4) Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago
(5) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Santiago
(6) Universidad Andrés Bello, Santiago
(7) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copiapó
(8) Neuchâtel University, Center for Hydrogeology and Geothermics, Switzerland

Mountains are often referred to as the "water towers" of the world due to their significant contribution to downstream societies and ecosystems. However, despite their critical role and their vulnerability to climate change, our understanding of these mountain hydrogeological systems, particularly the groundwater systems within them, remains limited. The complex nature of these systems poses challenges in terms of conceptualization, while their remote locations make observational and instrumental studies difficult. To enhance our understanding of mountain hydrogeological systems, it is crucial to overcome these methodological barriers.

In order to address this challenge, we have developed a comprehensive interdisciplinary approach to investigate the hydrogeological significance of geological structures in ungauged mountain catchments. The methodology incorporates several complementary methods, including geological mapping at multiple scales, a geophysical study involving on-ground Electrical Resistivity Tomography (ERT), gravimetry transects, and a UAV-based magnetic survey, as well as hydraulic data encompassing a 9 km transect of streamflow measurements during the recession period, long-term Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data, and various hydric markers such as a thermal spring and a puddle. We tested this methodology in the Parque Nacional del Río Clarillo, an ungauged catchment in the Andes Mountains with an area of approximately 130 km², which exhibits the intricate nature of mountain hydrosystems, characterized by fault zones, weathered zones, intrusive rocks, and volcano-sedimentary successions.

Our observations reveal a localized and significant increase of around 50% in streamflow over a short distance of 1 km, which cannot be attributed to any superficial water input and can only be explained by groundwater exfiltration. Through multiscale geological mapping and geophysical surveys, we identified a regional N-S fault and a secondary set of E-W local faults in the vicinity of the resurgence area, which likely serve as conduits for groundwater transport from a neighboring subcatchment to the resurgence area. Downstream of the resurgence area, no notable changes in baseflow were observed, indicating the presence of an impermeable granitic pluton identified through geological and geophysical mapping. Additionally, we identified a fractured zone within the volcanic unit in the Andean foothills, coinciding with a perennial thermal spring, which suggests the existence of upward flow and hydrogeological connectivity between the mountain block and the alluvial basin.

These findings strongly support the effectiveness of our proposed methodology in identifying geological structures that significantly influence the dynamics of baseflow throughout the catchment. The combination of complementary interdisciplinary methods allows us to infer the connections between geological and hydrogeological structures in an innovative manner. While the methodology does not aim to fully characterize the entire geological framework of the catchment, it pragmatically focuses on identifying hydrogeological relevant structures that can have an impact on baseflow and subsequently inform catchment management practices.

Keywords: structural geology, UAV-based magnetic, fault zone, mountain aquifer, groundwater-surface water interaction.

Financing: ANID-CONICYT/Fondecyt de Iniciación 11170380.

Acknowledgments: Thanks to the Pirque community for their incredible kindness, their constant support and their interest in the HydroPirque project: CONAF, APR El Principal, Pirque municipality, Carlos Uribe

Impacto de las Fluctuaciones Climáticas en el Nivel Freático y en la recuperación de Hidrocarburos a través del Sistema Bombeo y Tratamiento

José Antonio Margotta Coronado¹, José Manuel Bellalta¹

(1) GB CINCO AMBIENTAL, Avenida Ossa 235, Of. 960, Santiago, Chile

Las remediaciones de los acuíferos, en la realidad hídrica y climática actual, son métodos imprescindibles dirigidos a lograr sostenibilidad y una protección efectiva de los recursos para evitar riesgos a la salud humana y el ambiente.

El sistema de bombeo y tratamiento (B&T) es una de las metodologías de remediación con mayor aplicación para mitigar la presencia de hidrocarburos tanto en la zona no saturada del suelo como en el acuífero. El hidrocarburo sobrenadante en el acuífero freático, llamado Fase Libre No Acuosa (FLNA), puede ser observado en los pozos de monitoreo del área. El sistema B&T provoca una barrera hidráulica cuya característica y objetivo principal es generar un flujo nulo perpendicular al sentido de flujo subterráneo del acuífero freático, evitando el desplazamiento y expansión de FLNA e hidrocarburos disueltos en el agua subterránea.

Este estudio representa un caso específico en un área industrial donde las fluctuaciones climáticas generan cambios en los niveles de agua subterránea y variaciones en la presencia de hidrocarburos sobrenadantes en el subsuelo. Estas variaciones son cruciales para establecer los parámetros de acción del sistema de remediación, de esta manera, establecer una acción precisa que reduzca la influencia del ascenso o descenso del acuífero freático.

Los resultados del estudio realizado a partir de 12 pozos de monitoreo y 4 pozos de remediación muestran un alto rendimiento en las interacciones entre el hidrocarburo en flotación, el agua, el suelo y el equipo de extracción. Mediante bombeo, se afectan las condiciones naturales influenciadas por la climatología, variando los caudales entre 45 y 70 metros cúbicos para mantener la zona de acción y recuperación de FLNA. Como el subsuelo es heterogéneo (compuesto principalmente por arena, limo y presencia de grava fina), los efectos del bombeo modifican un escenario de estado estable y variaciones de niveles naturales hacia un escenario de recuperación de hidrocarburos y cambios en los niveles debido a los conos de descenso desde los pozos de remediación.

Si bien durante un año de estudio el proceso de remediación se mantiene recuperando FLNA desde el acuífero freático, los volúmenes de recuperación registrados declinan durante los meses de invierno (< 300 litros), cuando el nivel de agua subterránea aumenta (2 m de profundidad), mientras que durante los meses del periodo estival, el nivel de agua subterránea desciende (3 m de profundidad) y la recuperación se incrementa significativamente (> 400 litros), mostrando la influencia climática en su movilidad.

En este sentido, es importante mencionar que, al realizar estrategias de saneamiento de sitios, la variable climática debe ser considerada dentro de los puntos importantes de las operaciones. De esta manera, se aprovechan al máximo los periodos favorables de extracción y no se generan extensos periodos de tratamiento.

Palabras Clave: # Agua Subterránea # Remediación de agua subterránea # Hidrogeología.

Referencias:

- Cohen RM, Mercer JW, Greenwald RM, Beljin M (1997) Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems. EPA/540/S-97/504. 1-38.
- Charbeneau RJ, Johns RT, Lake LW, McAdams MJ (2000) Free-Product recovery of petroleum hydrocarbon liquids. Groundwater Monit Remediat 20:147-158.

Geomorphological impact on seepage distribution in complex mountain systems

Etienne Marti¹, Sarah Leray¹, Clément Roques²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago, Chile
 (2) Neuchâtel University, Center for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Neuchâtel, Switzerland

The contribution of mountains to the hydrological cycle are particularly critical, as they receive more precipitation and then water is transferred to the lowland aquifers. In an arid context, it can be the first contributor to the recharge of such aquifers (Immerzeel et al., 2020, Somers and McKenzie, 2020). This recharge is called "Mountain Front Recharge" (MFR) separated between "Surface Mountain Front Recharge" (SMFR) and "Mountain Block Recharge" (MBR) for its underground component (Markovich et al., 2019). The latter one is generally more complex to quantify and thus is often omitted in hydrogeological models, although it may account for as much as 50% of the total sedimentary basin recharge (Markovich et al., 2019). This complexity lies in the characterization of groundwater flows in mountainous context, generally presenting steep topography, highly heterogeneous geology, and orogenic influence over climatic variables (Winter, 2001). Particular attention has been paid to climatic and topographical components in recent research (Condon and Maxwell, 2015, Cuthbert et al., 2019, Gleeson & Manning, 2008). In contrast, the geological driver impact on groundwater flows is less well-known due to its complexity in mountain context as well as the difficulty to characterize it at depth and generalize geological features (Bense et al., 2013, Markovich et al., 2019). In order to fill this research void, we aim at evaluating the impact of geological structures on Mountain-block recharge and groundwater flow systems in mountain zones.

To do so we conduct numerical experiments on three-dimensional (3D) hydrogeological systems incorporating geological features typical of mountain areas (discontinuities and faults, intrusive rocks, weathered rocks, etc.). Geological models are defined with the help of surface geological knowledge and Geomodeler®. We then develop an approach for interfacing geological models and groundwater models (MODFLOW) on the FLOPY platform. Our hypothesis and methodology are tested in the Tarapacá Mountain block area as it is an idoneous example of both scientific and social challenges in Andean hydrosystems. A few indicators of groundwater flow system (groundwater flow lengths, mountain block recharge, interbasin connection, etc.) are compared in various geological settings, ranging from homogeneous, with limited active-depth, to more complex aquifer models involving diverse lithological formations and structures.

We found that the hydraulic conductivity K primarily controls the active depth of groundwater flows, groundwater flow scale and interbasin connection and therefore also controls the ratio SMFR/MBR. Applying a constant recharge rate over the basin, low values of hydraulic conductivity ($K < 10^{-8}$ m/s) limit the active depth of groundwater flows, favor shorter local paths directly interacting with surface water and thus increase the SMFR proportion. On the other hand, high values of K ($>10^{-8}$ m/s) in the mountain block will increase the active depth of groundwater flows and hence favor regional flow. This means a bigger proportion of MBR over SMFR that can reach 50% of the total MFR.

Our study highlights the impact of geological heterogeneities on flow length in agreement with previous studies. More importantly, a relation is established between MBR proportion and flow length. Regarding the impact of climate change, represented by decreasing recharge (R), it will accentuate the effects. Therefore, for a given hydraulic conductivity value, the proportion MBR/SMFR should increase in future climatic conditions.

Keywords: Groundwater flows, Geological heterogeneities, Mountain systems, Mountain block recharge.

References:

- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 127, 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
- Condon, L.E., Maxwell, R.M., 2015. Evaluating the relationship between topography and groundwater using outputs from a continental-scale integrated hydrology model. *Water Resour. Res.* 51, 6602–6621. <https://doi.org/10.1002/2014WR016774>
- Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K.M., Schneider, A., Hartmann, J., Lehner, B., 2019. Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. *Nature Clim Change* 9, 137–141. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>
- Gleeson, T., Manning, A.H., 2008. Regional groundwater flow in mountainous terrain: Three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. *Water Resour. Res.* 44. <https://doi.org/10.1029/2008WR006848>
- Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B.J., Elmore, A.C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J.S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P.D.A., Kulkarni, A.V., Mayewski, P.A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T.H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A.B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T., Baillie, J.E.M., 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature* 577, 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- Markovich, K.H., Manning, A.H., Condon, L.E., McIntosh, J., 2019. Mountain-Block Recharge: A Review of Current Understanding. *Water Resour. Res.* 55, 8278–8304. <https://doi.org/10.1029/2019WR025676>
- Somers, L.D., McKenzie, J.M., 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *WIREs Water* 7. <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>
- Winter, T.C., 2001. The concept of hydrological landscapes. *J Am Water Resources Assoc* 37, 335–349. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x>

Detección mediante geofísica somera de la circulación de agua termal en la interfase entre sedimentos y rocas fracturadas en el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui

Nicolás Pérez Estay¹, Eduardo Molina-Piñas², Tomás Roquer¹⁻³, Diego Aravena¹, Jaime Araya Vargas¹⁻⁴, Diego Morata¹⁻⁵, Gloria Arancibia¹⁻³, Pablo Valdenegro¹, Karin García¹, Daniel Elizalde¹⁻³

(1) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes CEGA, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

(2) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, Cádiz, España

(3) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

(4) Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó

(5) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

En general, los estudios que modelan y observan la circulación de agua caliente en medios fracturados analizan la circulación de agua a escala regional, es decir, a la escala de las cuencas hidrográficas. Esto es debido a que el proceso de circulación de agua meteórica por la corteza, que puede canalizarse en zonas de fallas, ocurre a lo largo de varios kilómetros verticalmente y hasta decenas de kilómetros horizontalmente. Sin embargo, la circulación en primeros metros de la corteza (~50 m) no se han estudiado en detalle, a pesar de su relevancia para la implementación de procesos productivos que aprovechen el agua termal. Este estudio se enfoca en comprender la circulación de agua termal en la parte más superficial de la corteza (~50 m), con un énfasis en los procesos que ocurren en la circulación de agua en la transición de un medio fracturado (zonas de falla) hacia los sedimentos suprayacentes. Como resultado se exponen las principales observaciones publicadas en Pérez-Estay et al. (2022) en relación con los medios fracturados y la circulación de agua termal en estos.

Para realizar este estudio se seleccionaron dos sitios termales localizados en Liquiñe (Región de Los Ríos, Chile): (i) las termas de Fucha y (ii) las termas de Hipólito-Muñoz. Estos sitios termales representan a dos de los sistemas de falla más importantes del Arco Volcánico Sur, el sistema de fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO) y las fallas transversales al arco (FTA), respectivamente. En primer lugar se realizó un levantamiento de geología estructural de cada sitio, donde se buscó definir las zonas de falla más relevantes. Posteriormente, se aplicó el método de corriente continua (ERT por sus siglas en inglés) con la intención de obtener varias tomografías de resistividad eléctrica por sitio termal, que permitiesen identificar la presencia de agua termal en estos primeros 50 m. El estudio se complementó con estaciones de ruido sísmico ambiental para definir la interfaz sedimento-roca, mediante el método de Nakamura o también conocido como HVSR. Al integrar estas metodologías se concluyó que:

- La interpretación conjunta de los métodos geofísicos de corriente continua (ERT) y de ruido ambiente (HVSR o método de Nakamura) con los datos de geología estructural son útiles para interpretar la circulación de agua termal de manera multifactorial, disminuyendo la incertidumbre para la planificación y localización de perforaciones.
- Los métodos geofísicos aplicados han permitido mejorar la identificación tanto de los sistemas de fallas, como de la circulación de agua termal, en zonas con sedimento y abundante cobertura de bosques.
- La circulación de agua termal en los dos sitios estudiados se concentra en (i) dominios de cuerpos subverticales profundos (desde 10-20 metros hasta 50 m) estrechamente relacionados con las fallas, y (ii) dominios de cuerpos subhorizontales someros anidados en la cobertura sedimentaria.
- El largo de los sistemas geotermiales activos en profundidad puede ser hasta el doble o triple más grande que la expresión de surgencias termales en la superficie.
- Las diferencias geométricas (subhorizontales vs subvertical) entre los cuerpos interpretados en los sedimentos y las rocas fracturadas saturados en agua termal, especulamos que se relacionan con los cambios de permeabilidad esperables para sedimentos v/s rocas fracturadas.
- En general, la distribución de agua termal en los sitios estudiados es compleja, incluyendo dominios diferentes entre la roca fracturada y los sedimentos. Esta información podrá ser usada de forma complementaria para la explotación del recurso mediante pozos, o para el manejo y gestión del agua termal.

Palabras Clave: geofísica somera, agua termal, geotermia, medios fracturados, tomografía de resistividad eléctrica.

Financiamiento: Este trabajo es una contribución del Proyecto ANID-FONDAP project #15090013, "Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)", ANID-FONDECYT project #1180167 y la beca CONICYT Ph.D. 1171178.

Agradecimiento: Los autores agradecen al Gobierno Regional de Los Ríos por el financiamiento parcial de este trabajo mediante el FIC código BIP 30486383-0. Las estudiantes Camila Aravena y María Paz Quercia también son agradecidas por su trabajo en terreno. Agradecemos también a Matías Taucare por sus discusiones y explicaciones respecto a los resultados de geoquímica de las aguas termales de Liquiñe.

Referencias:

- Pérez-Estay, N., Molina-Piñas, E., Roquer, T., Aravena, D., Araya Vargas, J., Morata, D., Arancibia, G., Valdenegro, P., García, K., & Elizalde, D. (2022). Shallow anatomy of hydrothermal systems controlled by the Liquiñe-Ofqui Fault System and the Andean Transverse Faults: Geophysical imaging of fluid pathways and practical implications for geothermal exploration. *Geothermics*, 104, 102435. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102435>.

Origen de las aguas subterráneas en el acuífero Ica - Perú, basado en geoquímica e isótopos ambientales

Joselito Jersin Robles Silvestre¹, Jesús Abel Mejía Marcacuzco¹, Fernando Paz Zagaceta¹

(1) Universidad Nacional Agraria La Molina, Recursos Hídricos, Ingeniería Agrícola, Av. La Molina S/N, Lima, Perú

El consumo del agua ha aumentado considerablemente a nivel global a causa de muchos factores como la creciente presión demográfica; alcanzando un estado crítico para la humanidad en términos de disponibilidad, cantidad, acceso y calidad, sobre todo a causa de la sobreexplotación de dicho recurso hídrico, siendo un claro ejemplo el valle de Ica, ubicado en la zona central y occidental de Perú. Este valle, es importante por su potencial agroexportador debido a sus altos índices de productividad y calidad, a la vez el acuífero se enfrenta a una extracción intensiva de agua subterránea; dando lugar a un descenso considerable de los niveles piezométricos a causa de la sobreexplotación del acuífero. Es necesario abordar el comportamiento del acuífero, origen de las aguas subterráneas, conexión con la montaña, así como dónde y cuándo recargar; y abordar las técnicas isotópicas (contenidos de ^2H y ^{18}O) ambientales presentes en el agua es una alternativa, ya que proporcionan información muy importante sobre el origen, flujo e historia de los cuerpos de agua. En el presente estudio se ha tenido por conveniente considerar el muestreo de agua usando una red de monitoreo para análisis isotópico y geoquímico, estudio de las fallas geológicas a lo largo de la cuenca Ica y cuencas vecinas, así como la geología del acuífero Ica y los mecanismos de recarga. La red de monitoreo isotópico se ubican en puntos estratégicos (Huacachina, Achirana, Casa Blanca, Challaca, Tambo, Cusicancha, Choclococha) considerando la cuenca baja, media y alta del río Ica, para la evaluación de aguas meteóricas muestreadas desde octubre del 2019, luego procesadas en el Laboratorio de la Universidad de Calgary (Canadá), y se usó la línea de agua meteórica local calculada a partir de las precipitaciones diarias $\delta^2\text{H} = 8,13 \delta^{18}\text{O} + 10,8\%$. La señal isotópica indicaría que el acuífero Ica recibe agua subterránea de dos fuentes principales: caminos de flujo subterráneo de la montaña con rutas de flujo intermedia y regional, centrados en recarga por bloque de montaña, así como en menor medida por el recorrido que hace el río Ica a lo largo de la cuenca, asociados a rutas de flujo local y superficial (modelo conceptual). Así lo demuestra la similitud entre la señal isotópica y la geoquímica del agua del manantial de Tambo y las precipitaciones en Cusicancha, comparadas con los manantiales que afloran en límite con el acuífero (Casa Blanca y La Achirana). Se han mapeado diversas fallas en la cuenca del río Ica por diferentes autores, y considerando que las subcuencas así como pequeños acuíferos de la cuenca alta, no se comportan como si fueran sistemas aislados, sino que estarían interconectados a través de fallas, este flujo subterráneo contribuye como recarga de bloque de montaña.

Palabras Clave: Agua subterránea, isótopos, fallas geológicas, acuíferos.

Ajustes al modelo hidrogeológico del sector Folilco en la Región de Los Ríos: nuevos antecedentes, a partir de datos AudioMagnetotelúricos y estratigráfica e hidráulica de captaciones subterráneas

Cristian Roncagliolo¹, Pablo Alarcón Pinto¹, Andrés Stuardo Espinoza¹

(1) Geo Resource Ltda., Chillán, Chile

En las próximas décadas se esperan cambios importantes en el ciclo global del agua, por efecto tanto del cambio climático como por intervenciones humanas (represas, consumo, riego, etc.), resultando en un fuerte impacto en la disponibilidad y demanda del recurso (Haddeland *et al.*, 2013).

De acuerdo con datos del Banco Mundial, el volumen promedio de agua disponible para cada habitante en Chile es de 53.953 m³/año (World Bank, 2010), cifra muy superior a los 2.000 m³/año de agua por habitante estimados como el mínimo necesario para un desarrollo sustentable. Sin embargo, la heterogeneidad en las condiciones climáticas y geográficas del país llevan a que cerca del 60% de la población viva en zonas donde el promedio de agua disponible no sobrepasa los 800 m³/año por persona (Valdés-Pineda *et al.*, 2014). Esta situación, de acuerdo con los modelos climáticos, se verá agravada durante el presente siglo, con una disminución de hasta un 70% en el volumen promedio de precipitaciones en varias regiones del sur de Chile (Garreud, 2011).

Ante estas nuevas condiciones, es imperioso mejorar la eficiencia en la gestión y explotación de cuencas y acuíferos. Al respecto, Arumi *et al.* (2012) evidencia que la errónea concepción de estos sistemas como unidades aisladas entre sí puede llevar a una mala administración de los recursos. El entendimiento de la dinámica entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas es entonces imprescindible para el uso racional y sostenible de acuíferos, los cuales deben ser monitoreados de manera acorde a sus características y el grado de explotación al que están sometidos (Sahuquillo *et al.*, 2008). Si consideramos la extensión espacial de los acuíferos, el peso de los factores logísticos y económicos no pueden ser ignorados; por lo tanto, es imperioso buscar técnicas que permitan definir con exactitud las características de estos acuíferos y su relación con las cuencas hidrológicas sobreyacentes en forma rápida y asequible. En esto las técnicas geofísicas de exploración resultan de utilidad, ya que a través de ellas es posible obtener desde la superficie datos complementarios del subsuelo con los cuales extrapolar información detallada de un determinado punto a un área mayor (Perdomo *et al.*, 2013) y así mejorar los modelos hidrogeológicos regionales y locales, permitiendo llevar a cabo una mejor gestión de cuencas hidrográficas y realizar modelos numéricos de mejor calidad para la proyección de disponibilidad hídrica de las próximas décadas.

De las diversas técnicas prospectivas de la geofísica, los métodos eléctricos y electromagnéticos han demostrado ser no solo aptos para ser aplicados en la búsqueda potencial de agua subterránea, sino también en la caracterización espacial de acuíferos (Marsan, 2017). Entre los parámetros electromagnéticos apropiados para la identificación de un cuerpo en el subsuelo, la resistividad eléctrica (ρ) es la más utilizada en las prospecciones geoelectricas, ya que puede alcanzar amplitudes de variación muy diversas (Palacky, 1988). A partir del contraste de valores de resistividad, es posible delimitar desde la superficie las distintas litologías del subsuelo (Auge, 2008).

En este trabajo se interpretó la estructura en profundidad de las distintas unidades hidrogeológicas en base a los valores de resistividad eléctrica del subsuelo obtenidos en el sector occidental de localidad de Folilco, concentrando 18 mediciones en un área de aproximadamente 700 hectáreas ubicada entre los ríos Quimchín y San Pedro, en la Región de Los Ríos. Para esto se recurrió al método Audio Magnetotelúrico (AMT); Una técnica que permite identificar las resistividades del subsuelo a partir de los campos eléctricos y magnéticos generados por corrientes que circulan naturalmente en él; por lo que, a diferencia de otros métodos geofísicos, como los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Tomografía Eléctrica (ERT) o Transiente Electromagnético (TEM), no se requiere recurrir a fuentes de energía externas, ni de disponer de grandes áreas despejadas para lograr un perfil que permita llegar a más de 200 m de profundidad como en el caso del SEV o ERT.

Para identificar y caracterizar las unidades hidrogeológicas se procedió a contrastar y correlacionar los datos de resistividad eléctrica obtenidos, con la información estratigráfica e hidráulica obtenida de las pruebas de bombeo de los distintos pozos construidos dentro del área de interés. También se consideró la información estratigráfica de pozos cercanos incluida en los registros de la Dirección General de Aguas, y la información aportada por la carta geológica (escala 1:100.000) e hidrogeológica disponible para la zona (escala 1:250.000).

El área de estudio se emplaza principalmente sobre de las unidades glaciofluviales Plgf1 y Plgf2, depositadas durante el evento de glaciación Llanquihue y Santa María, ocurridos entre ca. 73.000 - 14.550 AP y 262.000 - 132.000 AP (Duhart *et al.*, 2003), respectivamente. Sin embargo, el material extraído durante las perforaciones señala la existencia en profundidad de al menos otras dos unidades cuyos afloramientos se reconocen en el área de estudio. De estas, la unidad más antigua corresponde a las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa (PzTrma), las cuales conforman el basamento y la mayor parte de los altos topográficos en el sector. Hacia el norte de la localidad de Folilco, y adyacentes a PzTrma, Duhart *et al.* (2003) indica la presencia de depósitos de gravas cuarcíferas (Plfga), cuya depositación de acuerdo con su disposición, grado de alteración, erosión y espesor ha sido asignada al evento de glaciación Río Llico (Pleistoceno Inferior a Medio). Otras unidades cercanas reconocidas en superficie corresponden a depósitos fluviales antiguos (PIHf) y actuales (Hf).

En términos hidrogeológicos y de acuerdo con el mapa hidrogeológico presente en el estudio de Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Región de los Ríos (Lemus *et al.*, 2015), la zona de estudio se encuentra sobre las unidades A1 y A2//A1 limitando con B3 y D (Ver Figura 1). Durante este trabajo estas dos últimas unidades también se han reconocido en profundidad.

Lemus et al (2015) define A1 como un acuífero libre con potencias superiores a 30 m y niveles estáticos entre 1 y 22 m emplazado en las gravas dispuestas en una matriz de arenas gruesas con lentes de arena y limo de la unidad Plgf2, mientras que A2/A1 lo estipula como un acuífero libre en depósitos de gravas y arenas de origen fluviales/glaciofluviales de origen glaciofluvial (Plgf1) y fluvial (PIHf y Hf) dispuesto sobre un acuífero de arenas y gravas (Plgf2) confinado por sedimentos finos relacionados a depósitos morrénicos (Ver Figura 1). La unidad B3 es un acuífero libre presente en rocas metamórficas (PzTrma) cuya permeabilidad es de carácter secundaria y se debe a la acción de fracturas abiertas y fallas regionales que permiten la infiltración de agua (Lemus et al., 2015). Los depósitos de Plfga constituyen la unidad hidrogeológica D, la cual funciona como un acuíclodo debido a su baja permeabilidad y espesor.

Como resultado de este trabajo, se han generado dos modelos esquemáticos conceptuales preliminares, para el sistema acuífero presente en la localidad de Folilco, en los cuales se expresa la distribución en profundidad de las unidades hidrogeológicas, su continuidad lateral y características geométricas, considerando tanto los parámetros hidráulicos, estratigráficos y petrofísicos recopilados.

En el sector norte del área estudiada, se reconoce un sistema acuífero doble, donde el inferior es de naturaleza confinada, mientras el superior y de menor potencia varía entre semiconfinado a libre. Hacia el sur, los depósitos finos disminuyen en gran medida su espesor, reconociéndose arenas y gravas desde los 5 a 6 m bajo el nivel del terreno que constituyen secuencias de hasta 40 m de espesor. Las unidades acuíferas se presentan mayormente en depósitos de gravas y/o arenas de resistividad baja – media (90 a 200 ohm.m), las cuales son fácilmente distinguibles de otras unidades de menor resistividad (90 y 10 ohm.m) caracterizadas por una mayor presencia de limos y arcillas. Tanto los datos estratigráficos de pozos, como los de resistividad señalan la presencia de depósitos de menor granulometría emplazados sobre las unidades acuíferas, registrándose un espesor de 70 m hacia el Pozo 5 ubicado al norte del área de estudio y solo 5 m por la zona del Pozo 1, emplazada al sur. El basamento metamórfico que se reconoce entre los 95 y 105 m en los pozos 2 y 5 (Figura 1), respectivamente, registra valores de resistividad mínimos de 110 ohm.m que posiblemente corresponden a material del basamento (PzTrbma) meteorizado y/o fracturado, mientras que valores sobre 200 ohm.m obtenidos a mayor profundidad podrían estar señalando la presencia de basamento metamórfico con un menor grado de meteorización y/o alteración.

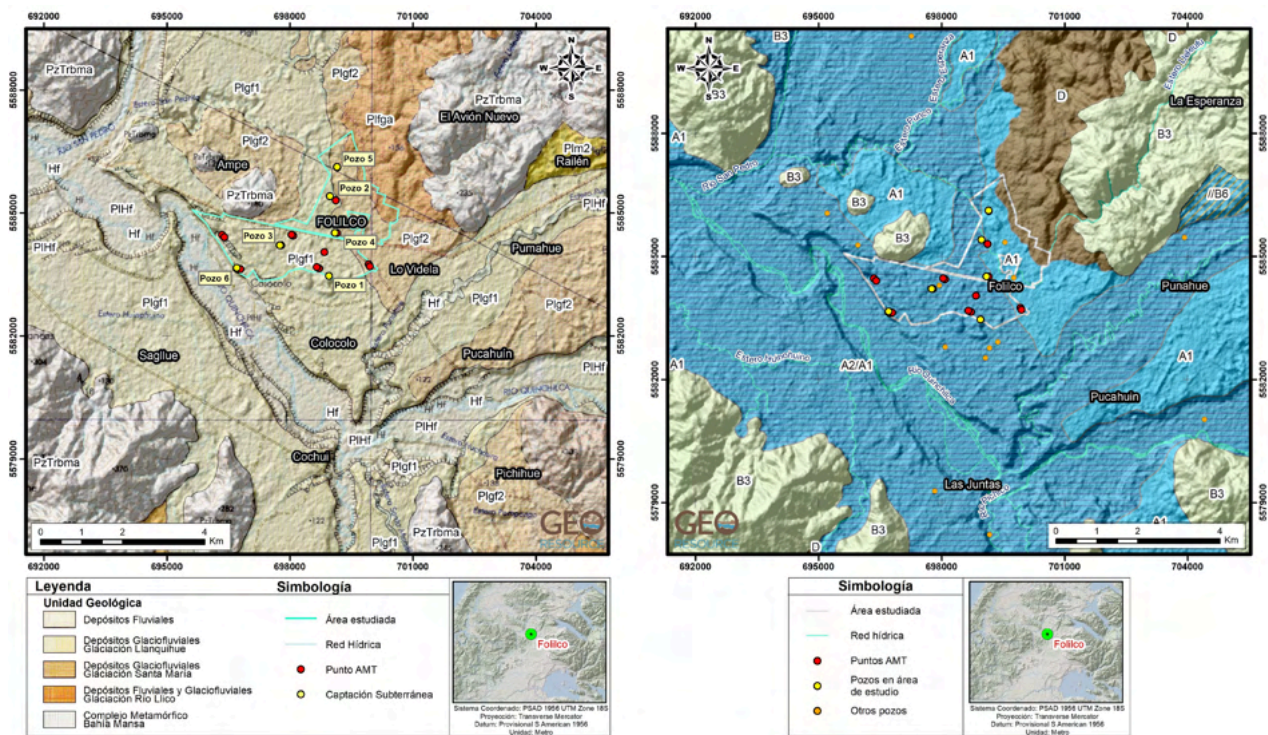


Figura 1. Derecha: Mapa geológico del área de estudio (Modificado de Duhart et al., 2003). Izquierda: Mapa hidrogeológico del área de estudio (Modificado de Lemus et al, 2015)). Ubicación de puntos AMT medidos, de pozos existentes en el sector y la de otros pozos cercanos analizados, son representados en círculos rojos, amarillos y naranjas, respectivamente.

Por la zona sur, captaciones profundas describen una unidad basal impermeable conformada por gravas compactas secas que subyacen a su vez a gravas cuarcíferas posiblemente pertenecientes a la unidad Plfga. Sin embargo, ninguna de estas unidades se reconoce en la estratigrafía de pozos presentes en la parte central del área de estudio, en donde además la geofísica señala la posible ocurrencia de depósitos de mayor resistividad no hasta sino una profundidad próxima a los 110 m de profundidad. Debido a estas condiciones es posible que ocurra la concentración del flujo en la parte central de la zona de estudio (Pozo 3 y 4), y la circulación del agua se produzca mayormente por los amplios depósitos permeables de gravas y arenas de la unidad Plgf1, cuya potencia hacia el este de la localidad de Folilco supera los 50 m.

Los depósitos impermeables de gravas compactas y gravas cuarcíferas posiblemente separan a los acuíferos existentes al este de Folilco de los más próximos al Río Quinchilca. Con respecto a este, las resistividades obtenidas y la estratigrafía del pozo existente (Pozo 6) concuerdan al señalar la existencia de un acuífero profundo localizado desde los 115 m bajo el nivel del terreno, cuya potencia comprobada es de al menos 35 m, pero que sin embargo y de acuerdo con la información de resistividad obtenida podría incluso extenderse hasta más allá de los 170 m de profundidad.

De forma preliminar y acuerdo con lo señalado anteriormente, se infiere la presencia de tres sistemas acuíferos independientes; uno más somero y de buen rendimiento (70 -75 l/s) concentrado en la parte central del área de estudio y cercano a la ruta T - 45 (al este de Folilco), un segundo sistema ubicado al norte, de menor rendimiento (4 -20 l/s) y cuya base limita con las rocas del basamento metamórfico. El tercer acuífero reconocido se emplaza por el límite oeste del área estudiada, en depósitos de gravas dispuestos desde los 135 m de profundidad que permiten un caudal de extracción de al menos 6 l/s.

Los datos geoelectrónicos obtenidos, en general presentaron una buena correlación con la estratigrafía de los pozos perforados y corroboran la disposición general de las unidades hidrogeológicas regionales establecidas por Lemus *et al.* (2014) para la zona. A escala local, la metodología utilizada permitió definir eficazmente la disposición de las unidades, definiendo correctamente los límites superiores, inferiores y en menor grado laterales (dependiente de la densidad de puntos AMT) de las unidades presentes en el subsuelo de la localidad de Folilco.

Palabras Clave: Hidrogeología, MagnetoTelúrico, Acuíferos Folilco, Región de Los Ríos.

Agradecimientos: Agradecemos el apoyo de Pudahue S.A y Perforroter S.A., en particular, al apoyo de los señores Luis Barrías, Nicolas Lizama y Hans Rosas. También el apoyo en terreno de R. Lepeley y J. Venegas.

Referencias:

- Arumí, J.L., Rivera, D., Muñoz, E., Bilib, M., 2012. Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. Obras y Proyectos. Vol. 12, 4-13.
- Duhart, P., Antinao, J.L., Clayton J., Elgueta, S., Crignola, P., McDonough, M., 2003. Geología del Área de Los Lagos – Malalhue, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, N° 81, 30 p., Mapa escala 1:100.000.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Stacke, T., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. PNAS. Vol. 111 (9), 3251-3256.
- Lemus, M., Honores, C., Aguilera, F., Pérez, Y., Morales, D., Cáceres, D., Neira, H., 2003. Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Región de los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, IR-15-59, 289 p., mapa escala 1:250.000
- Marsan, D., Azimzah, A., Adli, D. P., Muthhi'a, J., & Yuantoro, E., 2017. Aquifer Characterization using 2D Electrical Resistivity Imaging in Kidangpananjung, Cililin District, West Java. IOP Conference Series: EES. Vol. 62, 012014.
- PALACKY, G. J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. Electromagnetic methods in applied geophysics, 1, 52-129.
- Perdomo, S., Ainchilli, J., Kruse, E., Nigro, E., Tessone, M., Lagos, S., Pensa, M., 2013. Resistividad eléctrica y cargabilidad del acuífero Puelche en La Plata, Provincia de Buenos Aires. Congreso Argentino de Hidrogeología N°8 y Seminario Hispano-Latinoamericano N°6, 215-220.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, r., García-Chevesich, P., Valdés, J., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., Helwig, B., 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. Journal of Hydrology. Vol. 519, 2538–2567 WORLD BANK. 2010. World Development Indicators, 2010. The World Bank, Washington, DC

Estudiando el impacto antrópico sobre el acuífero aluvial de San Felipe (Chile Central)

Andrea Sagredo¹, Matías Taucare¹⁻²⁻³, Benoît Viguière⁴⁻⁵, Linda Daniele¹⁻²⁻³

- (1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (3) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (4) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France
 (5) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

Es bien sabido que las prácticas agrícolas alteran los sistemas hidrogeológicos dando lugar a la degradación de la calidad del agua subterránea, poniendo en riesgo la disponibilidad del agua dulce (Gao et al., 2021; Bouimouass et al., 2022). Si bien la agricultura es una de las principales actividades económicas de Chile, aún no se ha estudiado en detalle el impacto que esta genera en los acuíferos. En las últimas décadas el agua subterránea se ha impuesto como un recurso estratégico para el país, por lo cual cobra relevancia analizar en profundidad la calidad de las aguas subterráneas.

Se toma como caso de estudio el acuífero aluvial de San Felipe, ubicado en la cuenca del río Aconcagua en Chile Central para determinar el umbral de fondo e identificar el origen de los iones disueltos en el agua subterránea con el fin de evaluar adecuadamente el impacto de la agricultura en los acuíferos. Para determinar el umbral natural se consideraron las muestras de manantiales de un estudio previo, tomadas entre los años 2016 y 2018 en la zona cordillerana con nula o poca influencia antrópica (Taucare, 2020). Se utilizaron 56 muestras seleccionadas en base a los criterios descritos en Müller et al. (2006), se eliminaron aquellas muestras con errores de balance iónico superiores al 10%, con concentraciones de NO_3^- mayores a 10 mg/L, y aquellas con potencial de oxido-reducción negativo. Los valores de umbral natural fueron definidos por el percentil 90 de los datos de cada ion, obteniendo 9.0, 101.9, 7.7, y 12.7 mg/L para Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , y As, respectivamente. Una vez establecidos los umbrales, se compararon con 51 muestras de pozos tomadas desde el acuífero de San Felipe, a las cuales se les analizaron los contenidos de cationes, aniones, y elementos traza. Del total de muestras, 33 se encuentran sobre el umbral de Cl^- , 34 sobre el umbral de SO_4^{2-} , 45 sobre el umbral de NO_3^- , y 2 sobre el umbral de As. Posteriormente, los datos fueron procesados con análisis estadísticos multivariante para determinar la fuente de los iones disueltos. Los resultados del análisis factorial entregan 3 factores principales: (1) Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni, Sr; (2) HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , SiO_2 ; (3) NO_3^- .

Estos factores se interpretaron considerando la asociación de variables que los saturan y la distribución espacial de las puntuaciones factoriales, en cada muestra. Es así que los iones agrupados en el Factor 1 han sido asociados a la influencia del río Aconcagua en las muestras analizadas, lo cual es consistente con su composición química (Jorquera et al., 2015). Espacialmente, se observa que el Factor 1 tiene mayor peso en las muestras cercanas al río y a canales de regadío. La infiltración del agua del río por medio de canales de regadío no revestidos explicaría la distribución de este factor a zonas distantes del río (Taucare et al., 2020a; Figueroa et al., 2021). El Factor 2, asociado al proceso de interacción agua-roca, tiene mayor puntuación en muestras situadas en los bordes del acuífero aluvial. Las rocas de la Cordillera Principal son principalmente andesitas, por lo que la disolución de plagioclasas y minerales ferromagnesianos serían la fuente de los iones disueltos agrupados en el Factor 2 (Taucare et al., 2020a). Dada su distribución espacial, el Factor 2 podría reflejar flujos de agua subterránea provenientes del bloque de montaña (Taucare et al., 2020b; Figueroa et al., 2021). Por último, el Factor 3 formado solo por el NO_3^- , es la expresión de los fertilizantes empleados por la actividad agrícola y su incidencia en las muestras aumenta en el sentido de flujo.

De los resultados obtenidos hasta el momento, se concluye que la composición química del agua subterránea del acuífero aluvial de San Felipe es la suma de diferentes procesos que ocurren con intensidades diferentes en el acuífero. Además, la influencia de la actividad agrícola que se desarrolla en la zona es evidenciada por las muestras que sobrepasan los umbrales naturales y está especialmente asociada al Factor 3.

Palabras Clave: Hidrogeoquímica, Umbral de fondo, Análisis estadístico multivariante, Cuenca del Aconcagua.

Financiamiento: El financiamiento de este estudio fue proporcionado principalmente por el consorcio CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349, apoyado también por los programas de financiamiento público de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007 y Anillos Temáticos no. ATE220029.

Agradecimientos: Lo/as autores agradecen sinceramente a quienes facilitaron los accesos para el trabajo de campo.

Referencias:

- Bouimouass, H., Fakir, Y., Tweed, S., Sahraoui, H., Leblanc, M., Chehbouni, A., 2022. Traditional irrigation practices sustain groundwater quality in a semiarid piedmont. *CATENA* 210, 105923.
- Figueroa, R., Viguière, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment* 771, 145456.
- Gao, J., Li, Z., Chen, Z., Zhou, Y., Liu, W., Wang, L., Zhou, J., 2021. Deterioration of groundwater quality along an increasing intensive land use pattern in a small catchment. *Agricultural Water Management* 253, 106953.
- Jorquera, C.O., Oates, C.J., Plant, J.A., Kyser, K., Ihlenfeld, C., Voulvoulis, N., 2015. Regional hydrogeochemical mapping in central Chile: Natural and anthropogenic sources of elements and compounds. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 15, 72–96.
- Müller, D., Blum, A., Hart, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., Tomlin, C., Wendland, F., 2006. Final proposal for a methodology to set up groundwater threshold values in Europe. Report to the EU Project "BRIDGE", Deliverable D18.
- Taucare, M., 2020. Groundwater resources of the Western Andean Front: Insights from the Aconcagua Basin, Central Chile. PhD Thesis. Universidad de Chile.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguière, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020a. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment* 722, 137824.
- Taucare, M., Viguière, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., Leonardi, V., 2020b. Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile). *Hydrogeology Journal* 28, 2429–2438.

Estimación de la recarga de agua subterránea en una cuenca árida de la Cordillera de la Costa utilizando el código de balance hídrico de suelo SWB

Diego San Martín¹⁻²⁻⁴, Etienne Bresciani¹⁻²⁻³

(1) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas

(2) Consorcio Tecnológico del Agua Quitai-Anko

(3) Universidad de O'Higgins

(4) Universidad de La Serena

Los recursos hídricos subterráneos forman una reserva crítica de agua dulce en zonas áridas, además de ocupar un rol esencial en distintos ecosistemas. Para llevar un manejo sostenible de este recurso, es necesario estimar las entradas al sistema, es decir, la recarga de las aguas subterráneas. Actualmente existen pocos estudios en Chile enfocados sobre este tema. Con el fin de gestionar el recurso hídrico subterráneo, la Dirección General de Agua suele estimar la recarga con un método rudimentario que consiste en aplicar un factor de proporcionalidad arbitrario entre precipitación y recarga. Sin embargo, se sabe que la relación entre precipitación y recarga es una función compleja que depende la distribución temporal de la precipitación además de otras variables climáticas (temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad del aire) y físicas (topografía, geología, tipo y uso de suelo). Por lo tanto, nace la necesidad de cuantificar la recarga de las aguas subterráneas mediante métodos más avanzados.

En este estudio la recarga es calculada a través del código Soil Water Balance (SWB) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el cual corresponde a un modelo distribuido que utiliza un método modificado de Thornthwaite-Mather (1957) para hacer un balance hídrico a nivel de suelo. Así, el modelo realiza un seguimiento del cambio de humedad en el suelo en cada celda del dominio, evaluando las entradas y las salidas de agua del suelo en cada paso de tiempo, los cuales son diarios. La recarga ocurre cuando el suelo ha alcanzado su capacidad máxima de almacenamiento y es calculada como el término remanente una vez las salidas superficiales y el cambio de almacenamiento del suelo han sido restados de las entradas. Los parámetros del modelo son de tipo climático, topográfico y de características de suelo. Como resultados, el código entrega la infiltración neta (igual a la recarga, salvo que esa última puede ocurrir desfasada en el tiempo debido al tiempo de percolación en la zona no saturada), evapotranspiración real y el cambio de humedad en el suelo, en cada paso de tiempo.

Como caso de estudio se analiza la cuenca del Arrayán, la cual se encuentra en una zona árida y forma parte de la Cordillera de la Costa, en la región de Coquimbo. En la zona casi nunca se forma nieve debido a las condiciones climatológicas y topográficas, ni existen ríos permanentes. En escasos eventos de precipitaciones intensas pueden formarse ríos efímeros. Por lo tanto, la recarga puede ocurrir tanto de manera difusa (es decir a través de la infiltración directa de las precipitaciones) como de manera enfocada (es decir a través de la infiltración del río efímero).

Al aplicar el código SWB en la cuenca del Arrayán, se nota la importancia que adquiere la fase de estimación de los parámetros, la cual permite que el código entregue resultados coherentes con respecto a la recarga de aguas subterráneas, entre otros resultados. Además, es por esto, que se lleva a cabo un análisis de sensibilidad relacionado con los parámetros de entrada inciertos. A su vez, se prueban distintas opciones de cálculo de diferentes procesos hidrológicos que ofrece el código, con la finalidad de evaluar la incertidumbre sobre los valores de recarga calculados, ya que no siempre es obvio saber cuál método es el más correcto.

Los valores distribuidos de recarga obtenidos en este estudio serán utilizados como parámetro de entrada en una modelación hidrogeológica con el código MODFLOW, para la estimación de los flujos subterráneos, la cual permitirá evaluar el potencial de extracción sustentable en la zona de interés. Por otra parte, se destaca que, hasta donde sepamos, será la primera vez en el país en que se realiza un estudio de estimación de la recarga utilizando el código SWB, por lo que existe un gran potencial de replicar esta metodología en distintas zonas del país, permitiendo así mejorar el conocimiento de los recursos hídricos subterráneos en múltiples y diversas condiciones meteorológicas y geológicas como presenta el territorio chileno. En resumen, los resultados obtenidos en este estudio tienen importantes implicaciones para la gestión del agua en la cuenca del Arrayán, la región de Coquimbo y el país de Chile en general.

Palabras Clave: Agua subterránea, Recursos hídricos, Coquimbo.

Origen y composición química de las aguas subterráneas del acuífero Toro Bayo (39.85°S), Valdivia, Región de los Ríos, Chile

Josefa Sánchez Cortez¹, Fernanda Álvarez Amado¹, Daniele Tardani², Matías Taucare³, Linda Daniele³, Linda Godfrey⁴

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Rancagua, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile, Santiago, Chile

(4) Rutgers University, Department of Earth and Planetary Sciences, Busch Campus, 610 Taylor Rd. Piscataway, NJ 08854-8066, Nueva Jersey, Estados Unidos

El acuífero de Toro Bayo ubicado en el estuario del río Valdivia a 5 km al suroeste de la ciudad de Valdivia, Chile, es la principal fuente de suministros de agua potable para los habitantes e industrias de este sector.

Debido al aumento de viviendas en los últimos años y a la falta de un suministro de agua municipal, se ha producido un incremento exponencial en la demanda por el recurso hídrico subterráneo, lo que ha llevado a una sobreexplotación del acuífero y a la consiguiente contaminación causada por el proceso de salinización debido a la intrusión de agua de mar.

En marzo del año 2021 se realizó una campaña de muestreo de calidad de agua en la cual se analizaron un total de 37 pozos de agua subterránea y 2 muestras de aguas superficiales de afluentes cercanos a la cuenca, correspondientes al estero Estancilla y al río Valdivia. En este trabajo se presenta un análisis de los datos geoquímicos de iones mayores, trazas e isótopos estables ($\delta^{11}\text{B}$, $\delta^7\text{Li}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) obtenidos de la cuenca del sector Toro Bayo. El objetivo de este estudio es determinar el origen de los solutos y composición química de la zona de estudio, con el fin de caracterizar la extensión y magnitud de la intrusión salina.

El agua de Toro Bayo tiene una predominancia del flujo hacia el sur de la cuenca, fluyendo desde las zonas altas hacia las bajas hasta desembocar en el río Valdivia. En cuanto a la geología de la cuenca esta se localiza sobre Depósitos fluvioestuarinos del Pleistoceno, la Formación Santo Domingo del Mioceno y el Complejo Metamórfico Bahía Mansa del Paleozoico-Triásico. A partir de la información geológica y de las características hidráulicas, como transmisividad, conductividad y pH, se han definido tres unidades hidrogeológicas para la cuenca, estas van desde acuíferos confinados a semiconfinados.

En cuanto al análisis de iones mayores se determinó que en general las aguas del acuífero se agrupan en dos facies: aguas bicarbonatadas-mixtas en cationes y aguas cloruradas-sódicas, mientras que el estero Estancilla y río Valdivia pertenecen a facies cloruradas-sódicas. Mediante el análisis de los elementos trazas se puede tener una idea de la calidad de las aguas del acuífero al ser comparadas con los estándares de calidad determinados por las normas chilenas para el uso de agua potable en consumo humano (NCh409/1.Of2005) y uso de agua de regadío (NCh1333.Of78), determinando la existencia de 2 pozos que contiene más de un valor fuera del límite máximo permitido de concentración del elemento. Sumado a lo anterior, la correlación que existe en el aumento de la conductividad eléctrica en profundidad indicaría un problema de intrusión salina para la cuenca.

Los valores isotópicos de $\delta^{11}\text{B}$, $\delta^7\text{Li}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtenidos de las muestras de las aguas subterráneas del acuífero, del estero Estancilla y río Valdivia proporcionan una variable independiente que permite identificar el mecanismo por el cual se produce el proceso de salinización, permitiendo obtener información sobre el origen y los procesos de mezcla de las aguas y así una detección más directa del origen de los solutos presentes en las aguas. Para las aguas superficiales los valores isotópicos son muy similares ($\delta^{11}\text{B}$ +40,7‰, $\delta^7\text{Li}$ +26,48‰, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,709) mientras que para los diferentes pozos de la cuenca las razones varían, obteniendo valores para $\delta^{11}\text{B}$ de +12,2‰ a +43,3‰, $\delta^7\text{Li}$ de +5,00‰ a +19,62‰ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,704 a 0,708, lo cual indica la influencia de diferentes aportes en los pozos, pudiendo identificar cuáles serían los más afectados por intrusión salina.

Palabras Clave: Acuífero, Hidrogeoquímica, Geoquímica, ToroBayo, Valdivia.

Financiamiento: El presente trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT iniciación N°11220777 (Investigador Responsable: Daniele Tardani).

Canales de regadío: Una solución histórica para sobrellevar los tiempos de escasez hídrica

Matías Taucare¹⁻²⁻³, Benoît Viguié⁴⁻⁵, Linda Daniele¹⁻²⁻³

- (1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (3) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (4) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France
 (5) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

El apropiado uso de los recursos hídricos, frente a presiones antrópicas y el cambio climático, depende de una gestión sostenible, la cual está sujeta a una adecuada comprensión de los sistemas hidrogeológicos. En Chile Central la actual situación de sobreexplotación de los acuíferos aluviales, producto del excesivo otorgamiento de derechos de agua, y agravada por la Megasequía, ha resaltado la poca claridad que se tiene acerca del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos. La drástica caída de los niveles piezométricos en un periodo de 10 años, como ha ocurrido en San Felipe (~50 m), es la evidencia del riesgo de agotamiento de los acuíferos, ya que existe un desbalance entre las tasas de renovación y las extracciones realizadas.

Recientemente se ha demostrado que existen procesos de recarga artificial, no planificados, relacionados a la infiltración en canales de regadío (Taucare et al., 2020; Figueroa et al., 2021). Estos actúan como una "carretera hídrica" siendo un sistema de distribución que desviando el agua de los ríos la reparte por la cuenca. Aunque este sistema de captación de agua modifica el caudal natural de los ríos, los canales no revestidos permiten distribuir la infiltración a los acuíferos, ya que son excavados directamente en el suelo. La importancia de este proceso de recarga queda demostrada por mediciones realizadas en diferentes estudios. En la cuenca del Río Itata, por ejemplo, se infiltra hasta 12% del caudal por kilómetro de canal (CNR, 2017), y en la cuenca del Río Cachapoal se ha estimado que 52% de la recarga proviene de la infiltración de estos canales (Arumi et al., 2008).

Existen indicios de que en Chile Central algunos canales existen desde tiempos Precolombinos (Stehberg et al., 2021), y debido a su beneficio para los agricultores, la red de canales siguió creciendo hasta principios del siglo XX. No se conoce exactamente el tiempo en que los canales han generado recarga, pero se puede afirmar que ya son parte del ciclo del agua Andino y que mantienen una estrecha relación con el agua subterránea. La evidencia de esta relación ha quedado plasmada en la huella isotópica de las aguas subterráneas del Acuífero de San Felipe (cuenca del Río Aconcagua; Taucare et al., 2020), resaltando la relevancia de la recarga que generan los canales y su participación activa en el ciclo hidrogeológico. Lo anterior permite afirmar que probablemente los canales han mitigado localmente el impacto de la sobreexplotación actual, y de las sequías. De hecho, sistemas similares se han implementado por culturas preincaicas e hispano-romanas (entre otras) como herramienta de adaptación a la escasez de agua (Bouimouass et al., 2022; Jódar et al., 2022). No obstante, en los últimos años se ha optado por impermeabilizar los canales para evitar la "pérdida de agua" por infiltración. Esta medida va a disminuir la infiltración hasta un 95% (Meijer et al., 2006), afectando notablemente la recarga de los acuíferos, sin tener conciencia del impacto que se gatilla en la renovación de los recursos hídricos subterráneos. Los autores consideran que los canales no revestidos deberían ser considerados como una infraestructura sustentable para la gestión de la recarga aportando de forma eficiente a la gestión integral y de costo reducido en comparación con otras infraestructuras de recarga.

Especialmente porque los canales son soluciones adaptadas al contexto local, ya están presentes (es decir no hay costos de instalación) y la evidencia científica indica que son parte fundamental del balance hídrico de los acuíferos de Chile Central.

Palabras Clave: Recarga antrópica, Soluciones basadas en la naturaleza, Gestión de agua subterránea, Chile Central.

Financiamiento: El financiamiento de este estudio fue proporcionado principalmente por el consorcio CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349, apoyado también por los programas de financiamiento público de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007 y Anillos Temáticos no. ATE220029.

Agradecimientos: Lo/as autores agradecen sinceramente a quienes facilitaron los accesos para el trabajo de campo.

Referencias:

- Arumi J.L., Rivera D., Holzapfel E., Boochs P., Billib M. & Fernald A., 2008. Effect of the irrigation canal network on surface and groundwater interactions in the lower valley of the Cachapoal River, Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69 (1), 12-20.
- Bouimouass, H., Fakir, Y., Tweed, S., Sahraoui, H., Leblanc, M., Chehbouni, A., 2022. Traditional irrigation practices sustain groundwater quality in a semiarid piedmont. *CATENA* 210, 105923. CNR. 2017. Diagnóstico para desarrollar plan de riego en la Cuenca de Itata. Comisión Nacional de Riego (CNR), Santiago, Chile.
- Figueroa, R., Viguié, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment* 771, 145456.
- Jódar, J., Zakaluk, T., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Lechado, C.M., Martín-Civantos, J.M., Custodio, E., Urrutia, J., Herrera, C., Lambán, L.J., Durán, J.J., Martos-Rosillo, S., 2022. Artificial recharge by means of careo channels versus natural aquifer recharge in a semi-arid, high-mountain watershed (Sierra Nevada, Spain). *Science of the Total Environment* 825, 153937.
- Meijer, K., Boelee, E., Augustijn, D., van der Molen, I., 2006. Impacts of concrete lining of irrigation canals on availability of water for domestic use in southern Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 83, 243-251.
- Stehberg, R., Osorio, G., Cerda, J.C., 2021. Mapocho incaico central: distritos prehispánicos de irrigación. *Publicación Ocasional Del Museo Nacional de Historia Natural* 71, 5-60.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguié, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment* 722, 137824.

¿Se pueden considerar como nuevas fuentes hídricas las rocas fracturadas en Chile?

Matías Taucare¹⁻²⁻³, Benoît Viguié⁴⁻⁵, Etienne Bresciani⁵, Daniele Tardani⁵, Diego Morata¹⁻², Linda Daniele¹⁻²⁻³

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(4) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France

(5) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

Asegurar el suministro de agua ante los escenarios de cambio climático y del aumento en su demanda es una de las mayores preocupaciones a nivel global, y también lo es para Chile. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (FAO, 2021), la macrorregión de Chile Central se encuentra actualmente en un estado de estrés hídrico crítico. Dicho contexto ha incentivado la búsqueda de nuevas fuentes hídricas para satisfacer la creciente demanda de agua, y entre algunas opciones, se ha considerado explorar las rocas fracturadas como tal. En Chile Central, el agua subterránea se extrae a través de pozos desde los acuíferos aluviales ubicados en los valles, que suelen ser considerados más simples de explotar que los acuíferos fracturados, a pesar de que el 85% del territorio nacional se compone de rocas fracturadas. El hecho de que las rocas fracturadas no se hayan considerado en el pasado como posibles fuentes hídricas hace hoy día suponer que en Chile se cuenta con más recursos hídricos que los estimados.

Un estudio multidisciplinario realizado en el sector precordillerano de Los Andes-San Felipe, que integra hidrogeoquímica, isotopía, geofísica, topología y geología estructural, ha entregado información para abordar la factibilidad de las rocas fracturadas como nueva fuente hídrica (Taucare et al., 2020a, 2020b, 2022; Figueroa et al., 2021). Los resultados destacan que el agua subterránea de los acuíferos aluviales se originó por precipitaciones que ocurrieron sobre los 2000 m s.n.m en la Cordillera de los Andes. Parte de esas precipitaciones se infiltra en los valles de media montaña, alimentando la circulación de agua subterránea en las rocas volcánicas de la cordillera, la cual permite recargar de manera "oculta" a los acuíferos aluviales de los valles adyacentes, a través de fallas geológicas oblicuas al frente de montaña. De esta forma, se revela que las rocas fracturadas alimentan los acuíferos que hoy explotamos, es decir, es la misma agua que circula desde un compartimiento hidrogeológico a otro. Por lo tanto, en base a la evidencia de los resultados obtenidos hasta la fecha, considerar las rocas fracturadas como una "nueva fuente hídrica" puede incentivar la extracción descontrolada de agua en estos medios complejos, provocando una disminución en la renovación del recurso hídrico de los acuíferos aluviales que actualmente nos abastecen de agua.

Palabras Clave: Procesos de recarga, Medios fracturados, Hidrogeología de montaña, Chile Central.

Financiamiento: El financiamiento de este estudio fue proporcionado principalmente por el consorcio CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349, apoyado también por los programas de financiamiento público de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007 y Anillos Temáticos no. ATE220029.

Agradecimientos: Lo/as autores agradecen sinceramente a quienes facilitaron los accesos para el trabajo de campo.

Referencias:

- FAO, 2021. Progress on level of water stress: Global status and acceleration for SDG indicator. Figueroa, R., Viguié, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., Daniele, L., 2021. Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment* 771, 145456. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>.
- Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez-Estay, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguié, B., Figueroa, R., Morata, D., Daniele, L., 2022. Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pucuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8°S). *Journal of South American Earth Sciences* 118, 103914. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103914>.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguié, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020a. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment* 722, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.
- Taucare, M., Viguié, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., Leonardi, V., 2020b. Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile). *Hydrogeology Journal* 28, 2429–2438. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02200-3>.

Agua Subterránea en las rocas fracturadas del Cajón del Maipo, Cuenca alta del Maipo, Los Andes de Chile Central

Denisse Toro Andrade¹⁻², Sebastián Yáñez¹, Linda Daniele¹⁻²⁻³, Matías Taucare¹⁻²⁻³, Benoît Viguier⁴⁻⁵, Pedro Simonovic¹⁻², Martín González¹

- (1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (3) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (4) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France
 (5) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

Los sectores montañosos son fuentes esenciales de agua dulce para las poblaciones y se espera que la dependencia del suministro de este recurso aumente con el tiempo, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Viviroli et al., 2020). Sin embargo, el agua en la montaña y especialmente el agua superficial, ha experimentado grandes cambios en su caudal debido a la creciente demanda de agua y al cambio climático, por lo que la población y ecosistemas que dependen de este recurso ven aumentada su vulnerabilidad (Hock et al., 2019).

Por su parte, el agua subterránea es la mayor reserva de agua dulce líquida en el planeta (99%; UNESCO et al., 2022) y, en ocasiones, representa el flujo base de ríos, lagos, humedales y otros ecosistemas asociados (Huggins et al., 2023). Además, suele ser menos vulnerable a cambios hidroclimáticos abruptos (Cuthbert et al., 2019). Sin embargo, aún no se ha estudiado en profundidad el componente subterráneo en las zonas de alta montaña, puesto que se suele considerar insignificante en relación con los componentes superficiales del ciclo del agua, y cuando se ha estudiado se describe principalmente como acuíferos someros asociados a depósitos aluviales (e.g., Glas et al., 2019). Mientras que la circulación de agua subterránea en el basamento se suele despreciar. Esta visión ha influido en el conocimiento del flujo subterráneo en zonas de montaña que a su vez es una problemática trasladada a la gestión integrada del recurso hídrico ya que no se consideran todas las componentes involucradas en el ciclo hidrogeológico.

Enmarcado en este contexto, este estudio tiene por objetivo de contribuir al conocimiento del agua subterránea en alta montaña, tomando como caso de estudio la cabecera de la cuenca del río Maipo en Chile Central, el "Cajón del Maipo", desde donde se estima que proviene más del 80% del abastecimiento de agua de los casi 7 millones de habitantes la Región Metropolitana (Alvarez-Garretón et al., 2022).

Para abordar este desafío hemos utilizado métodos hidrogeoquímicos (cationes, aniones, y trazas), isótopos del agua ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H), y el análisis de conectividad de fracturas con el fin de evaluar la posible circulación de agua en las rocas fracturadas del Cajón del Maipo y esclarecer algunos aspectos hidrodinámicos.

Los resultados de este estudio muestran que en su mayoría el agua superficial es del tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$, mientras que las muestras de agua subterránea presentan variabilidad en su composición, aunque principalmente son $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$. Por su parte, los isótopos estables del agua señalan que muestras de agua subterránea tomadas de túneles no han sido afectadas por evaporación. La altura origen de las aguas de los túneles bordea los 3.200 m s.n.m. en aquellas muestras del túnel que se encuentra a los 2.500 m s.n.m., mientras que en aquel túnel ubicado a los 800 m s.n.m. las muestras se originaron a los 2000 m s.n.m. Esto quiere decir que las muestras han recorrido entre 700 y 1.200 m en la vertical desde su origen al punto de muestreo. La altura origen se relaciona espacialmente con zonas de alta conectividad de fracturas, destacando el rol de las fracturas en la recarga y posterior circulación de agua subterránea. Por último, el contenido de Tritio revela la existencia de agua subterránea joven entre los 20 y 50 años. Estos análisis corroboran la circulación por roca fracturada con distintos tiempos de residencia y patrones de circulación, cuya circulación y recarga se ven favorecidas por la ocurrencia de zonas de alta densidad de fracturas conectadas.

Palabras Clave: Agua subterránea, Rocas fracturadas, Hidrogeoquímica, Isótopos estables del agua, Dataciones de agua.

Financiamiento: Este trabajo ha sido realizado en el marco del Consorcio Tecnológico Centro Avanzado para las Tecnologías del Agua (CAPTA), proyecto CORFO 19CTIGH-121349, ANID Fondo Extraordinario Sequía FSEQ210007, ANID Anillos Temáticos ATE220029, y la beca ANID de Doctorado Nacional no. 21231441 (Denisse Toro).

Agradecimientos: Los datos utilizados en este estudio fueron tomados del informe "Estudio de origen de aguas: Túneles Proyecto Alto Maipo" realizado por SRK consulting en 2020.

Referencias:

- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J., Marinao, R., 2022. La crítica situación del agua potable en la Región Metropolitana. CR2. Recuperado de <https://www.cr2.cl>.
- Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K.M., Schneider, A., Hartmann, J., Lehner, B., 2019. Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>.
- Glas, R., Lautz, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H., 2019. High mountain areas. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D., Masson-Delmonte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. (Eds.), *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 131–202.
- Huggins, X., Gleeson, T., Serrano, Zipper, S., Jehn, F., Rohde, M., Abell, R., Vigerstol, K., Hartmann, A., 2023. Overlooked risks and opportunities in ground watersheds of the world's protected areas. *Nat Sustain*. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01086-9>.
- Somers, L.D., McKenzie, J.M., 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 7, e1475. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1475>.
- Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M., Wada, Y., 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability* 2020 3:11 3, 917–928. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9>.

Aprendizajes y hallazgos a partir de la publicación de libro sobre agua subterránea y escasez hídrica

Sofía Vargas Payera¹⁻⁴, Matías Taucare¹⁻², Claudio Pareja⁵, Jessica Vejar³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM

(2) Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

(4) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA

(5) Centro de Estudios del Desarrollo Regional y Políticas Públicas, Universidad de Los Lagos

En las regiones áridas, las aguas subterráneas desempeñan un papel clave en el desarrollo de las actividades socioeconómicas y el bienestar humano. Sin embargo, las crecientes presiones antropogénicas y climáticas impactan críticamente en la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. En América Latina, se viene experimentando una secuencia ininterrumpida de años secos. Chile no es una excepción. Desde 2010, las tasas de precipitación y los déficits de descarga de los ríos han sido dramáticos. Esto sumado a un alto grado de extracción y la sequía han provocado un alarmante descenso de los niveles de agua subterránea. En consecuencia, este escenario exige la integración de actores y prácticas para mejorar la comprensión y cuidado del agua.

En este contexto, esta ponencia reflexiona a partir de la publicación del libro "Agua: un viaje (in)finito", libro para público desde los 8 años, que busca aumentar el nivel de consciencia pública y el pensamiento crítico sobre las aguas subterráneas y su papel en el ciclo hidrogeológico. Basado en un enfoque transdisciplinario, esta publicación cruza el conocimiento académico (hidrogeología, sociología y pedagogía) y el conocimiento empírico. En este proceso participaron actores sociales de cooperativas rurales de agua y estudiantes de escuelas de Putaendo y Renca. Este proyecto tuvo dos objetivos. Por un lado, analizar cómo un enfoque transdisciplinario podría promover una mejor comprensión de la escasez de agua, brindando la oportunidad de integrar diferentes estilos y racionalidades y por otro, reflejar este proceso de coproducción de conocimientos en un libro infantil interactivo.

Durante el proceso de construcción (2021-2022) participaron 25 niños y niñas de ocho a 12 años y tres organizaciones sociales y se realizaron actividades con enfoque transdisciplinario. Esta investigación constata que los proyectos educativos sobre agua subterránea aumentan la concienciación de la población sobre el papel de este elemento. Por otra parte, confirma que la creación de material contextualizado y que incorpore el conocimiento y la experiencia ya presentes en las comunidades, aumenta la conciencia pública y comprensión de conceptos abstractos. Este proyecto aplicado ofrece la oportunidad de describir algunos de los retos y beneficios de integrar el conocimiento empírico en el científico, y de incluir a la sociedad civil y a los niños en el proceso.

Esta ponencia presenta los hallazgos asociados a la percepción social de cada actor participante (academia, actores sociales, público infantil) sobre esta temática, así como los desafíos y oportunidades de los procesos transdisciplinarios para aumentar la sustentabilidad y cuidado de acuíferos en Chile.

Palabras Clave: agua subterránea, sociedad, educación, transdisciplina

Financiamiento: El apoyo financiero para la publicación del libro "Agua: una travesía (in)finita" fue proporcionado principalmente por el Ministerio de Ciencia Tecnología, Conocimiento e Innovación a través del fondo Ciencia Pública n° CP200162.

Agradecimientos: Colegio Cervantino de Putaendo, la escuela Los Vásquez de Renca, a la Federación Nacional de Agua Potable Rural (FENAPRU), Fundación NEWENKO.

Referencias:

- Blades M, Spencer C (1994) The development of children's ability to use spatial representations. *Adv Child Dev Behav* 25:157–199.
- Boreux V, Born J, Lawes MJ (2009) Sharing ecological knowledge: opportunities and barriers to uptake. *Biotropica* 41(5):532–534.
- Bracken LJ, Oughton EA (2006) 'What do you mean?' The importance of language in developing interdisciplinary research. *Trans InstBr Geogr* 31(3):371–382.
- Burns TW, O'Connor DJ, Stocklmayer SM (2003) Science communication: a contemporary definition. *Public Underst Sci* 12(2):183–202
- Chawla L, Cushing DF (2007) Education for strategic environmental behavior. *Environ Educ Res* 13(4):437–452
- CNID (2016) Ciencia e innovación Para los desafíos del agua en Chile.
- Dickerson D, Dawkins K (2004) Eighth grade students' understandings of groundwater. *J Geosci Educ* 52(2):178–181.
- Ekmekçi M, Günay G (1997) Role of public awareness in groundwater protection. *Environ Geol* 30(1):81–87.
- Hill WG, Butterfield P (2006) Environmental risk reduction for rural children. *Rural nursing: concepts, theory, practice*, 2nd edn. Springer, Heidelberg, Germany, pp 270–281.
- Hussein H (2018) A critique of water scarcity discourses in educational policy and textbooks in Jordan. *J Environ Educ* 49(3):260–271.
- Korhonen K, Lappalainen A (2004) Examining the environmental awareness of children and adolescents in the Ranomafana region, Madagascar. *Environ Educ Res* 10(2):195–216.
- Krueger T, Maynard C, Carr G, Bruns A, Mueller EN, Lane S (2016) A transdisciplinary account of water research. *Water* 3(3):369–389.
- Megdal SB (2018) Invisible water: the importance of good groundwater governance and management. *Clean Water* 1(1):1–5.
- Orr DW (2004) *Earth in mind: on education, environment, and the human prospect*. Island, Washington, DC.
- Pohl C, Klein JT, Hoffmann S, Mitchell C, Fam D (2021) Conceptualising transdisciplinary integration as a multidimensional interactive process. *Environ Sci Pol* 118:18–26.

Vulnerabilidad de los acuíferos costeros de Chile Central frente a fenómenos de intrusión salina: caso de Pichilemu

Benoît Viguier¹⁻², Etienne Bresciani², Fernanda Gallegos-Poch³, Gustavo Perez⁴⁻⁵, Catalina Lizarde³, Gonzalo Yáñez³, Morgane Derrien⁶, Daniele Tardani², Claudia Rojas⁶⁻⁷

(1) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Escuela de Ingeniería, Rancagua, Chile

(5) Universidad de Granada, Departamento de Geodinámica, Campus Fuentenueva, Granada, España

(6) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales (ICA3), Rancagua, Chile

(7) Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Santiago, Chile

Garantizar el suministro de agua y una gestión sostenible de los recursos hídricos ante los escenarios de cambio climático y la creciente demanda es una preocupación mundial establecida en el ODS6 de las Naciones Unidas. El acceso al recurso hídrico se aborda en primer lugar como una pregunta cuantitativa, especialmente en zonas semiáridas. Sin embargo, la calidad del recurso puede ser inapropiada para el desarrollo de las actividades socioeconómicas, como el suministro en agua potable y la agricultura. Tal situación es conocida en las zonas litorales, donde la cercanía de los acuíferos con el agua salada del mar y la disminución significativa de los niveles piezométricos generan fenómenos de intrusión salina.

En los acuíferos del litoral chileno, la profundización de los niveles piezométricos asociado a un aumento de las extracciones y de la mega sequía desde 2010 amenaza la calidad del recurso promoviendo los fenómenos de intrusión salina. Para abordar la vulnerabilidad de estos sistemas hidrogeológicos, proponemos estudiar - mediante un análisis pluridisciplinario (hidrodinámica, geofísica y fisicoquímica) - el sistema acuífero de Pichilemu (región de O'Higgins) localizado en depósitos aluviales del estero San Antonio, aguas arriba de la laguna costera Petrel. El acuífero está principalmente explotado para la irrigación y monitoreado por un pozo de observación de la DGA (d≈3,7 km del mar) en la parte alta, revelando niveles hasta -40 m s.n.m.

Luego de realizar e interpretar una prueba de bombeo en una noria (d≈1,5 km del mar), se ha evaluado que la transmisividad del acuífero libre varía entre $1,10^{-3}$ y $3,10^{-3}$ m²/s, según la solución utilizada. El comportamiento del descenso demuestra el carácter libre del acuífero. El monitoreo de dicha noria inició en noviembre de 2022, e incluyó el registro de la presión, temperatura y conductividad eléctrica cada 5 minutos. Los resultados muestran que la conductividad eléctrica está correlacionada con la intensidad de la actividad del bombeo: el valor es significativamente más alto (máximo 10,12 mS/cm) durante periodos de bombeo intensos que en el resto del periodo donde la extracción es puntal (mínimo 2,61 mS/cm). Esta correlación se interpreta como una intrusión salina producto del bombeo, donde el agua relativamente dulce del acuífero (<2,7 mS/cm) es reemplazada por agua más salada (>10,1 mS/cm). A una escala temporal más pequeña, durante el bombeo, se pueden identificar dos contribuciones/procesos diferentes: (i) durante el descenso, el agua dulce del compartimiento superior del acuífero libre circula verticalmente hacia abajo (drenaje por gravedad) y disminuye la conductividad eléctrica; (ii) durante la recuperación, el agua salada sube y aumenta la conductividad eléctrica. El bombeo tiene como efecto neto aumentar la salinidad. El mapeo geofísico del sitio (julio 2022), incluyó perfiles de tomografía eléctrica (ERT) y el mapeo subsuperficial por medio de un equipo electromagnético en el dominio de la frecuencia (SLINGRAM; EM38). La campaña muestra la presencia de un horizonte de resistividad aparente entre 20 y 50 Ω.m (0,5 – 0,2 mS/cm) en los primeros metros, sugiriendo la presencia de agua dulce. A mayor profundidad (> 7 m) debajo de la noria monitoreada, se han identificado horizontes más conductores < 2 Ω.m (> 5 mS/cm), sugiriendo la presencia de agua salobre o salada. Por otro lado, la cartografía de la conductividad eléctrica (julio 2022 y abril 2023) en las aguas superficiales del estero y de la laguna Petrel revelan un aumento en el espacio de la conductividad eléctrica entre el río cerca de la noria (≈11 mS/cm) y la desembocadura de la laguna (≈18 mS/cm). En su conjunto, los datos sugieren un fenómeno de intrusión salina en el acuífero a partir del estero San Antonio, caracterizado por una interfaz agua dulce – agua salada. La salinidad del estero sería a su vez controlada por la migración hacia el interior de agua salobre de la laguna costera Petrel.

Este estudio demuestra la vulnerabilidad en la calidad de los recursos hídricos subterráneos del litoral chileno frente a fenómenos de intrusión salina. En la zona central y centro-sur de Chile, varias cuencas de la Cordillera de la Costa se encuentran aisladas de los flujos superficiales que provienen de las precipitaciones y del derretimiento de la criosfera en la Cordillera Principal. Por lo tanto, estos acuíferos son más vulnerables que los grandes acuíferos de la depresión central y debiesen ser monitoreados, tanto desde sus aspectos de cantidad como de calidad.

Palabras Clave: acuíferos costeros, Intrusión salina, hidrodinámica, geofísica.

Financiamiento: Sistema articulado de investigación en cambio climático y sustentabilidad de zonas costeras de Chile (2022-2024) URO RED21992. Universidad de O'Higgins. Escuela de Ingeniería. Universidad de O'Higgins.

Agradecimientos: Cadudzzi Salas, Municipalidad de Pichilemu y Eugenio Leiva.

El alarmante estado de los acuíferos de Chile Central

Benoît Viguier¹⁻², Matías Taucare³⁻⁴⁻⁵, Ronny Figueroa⁶, Linda Daniele³⁻⁴⁻⁵

(1) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.

(4) Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(5) Universidad de Chile, Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(6) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Grupo de Geociencias, La Serena, Chile.

Los recursos hídricos subterráneos están desempeñando un papel crucial, especialmente en zonas semiáridas donde existe una creciente escasez espacio-temporal de los recursos hídricos superficiales y de la criosfera. No obstante, el agotamiento de los acuíferos es una tendencia mundial, y Chile no es la excepción. En la macrorregión central del país, el suministro de agua para las actividades socioeconómicas se ha visto afectado por una secuencia continua de años secos desde el 2010 (Megasequía) sumado a una creciente demanda de agua. Además, los escenarios futuros de los recursos hídricos no son alentadores (SSP5-8.5), puesto que se espera un déficit en la lluvia de -20 y -35% a mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente. La solución "evidente" que apareció ha sido recurrir al agua subterránea para satisfacer las necesidades de agua. Pues, así desde hace tiempo se está registrando un aumento de las extracciones, en parte como consecuencia a la crisis hídrica instalada en Chile Central, que ha llevado a una profundización de los pozos existentes.

Sin embargo, aún existen grandes incertidumbres asociadas al conocimiento de los acuíferos, entre las cuales destaca la respuesta tanto a la disminución de las precipitaciones como a la creciente demanda de los recursos hídricos subterráneos. En detalle, este aumento de las extracciones está ocurriendo sin que se tenga información fehaciente acerca de (i) las tasas de renovación de los recursos en los sistemas hidrogeológicos y (ii) los procesos al origen de la disminución de los niveles de agua en los acuíferos de Chile Central. Para abordar al menos una parte de las incertidumbres, hemos realizado un análisis de la evolución espaciotemporal de los niveles piezométricos a partir de 461 pozos de observación y 27.157 derechos de agua de Chile Central entre 1970 y 2020, disponibles en la base de datos de la Dirección General de Aguas.

Los resultados revelan que durante las últimas cinco décadas se observa un aumento sistemático de los bombeos para satisfacer la demanda de agua (15,8 m³/s en 1970 a 281,9 m³/s 2020), principalmente para el sector de la agricultura (63,1%) y suministro en agua potable (18,8%). Este aumento se refleja en una aceleración notable de la tasa anual de otorgamiento de los derechos (10 m³/s por año) a partir de 1997, en comparación a 1970s y 1980s (0,4 y 2,3 m³/s por año), y por una expansión explosiva de las extracciones a todos los valles. El aumento de la tasa de otorgamiento de los caudales de extracción se ha realizado junto con una disminución del caudal mediano por derecho otorgado antes (10 l/s) y después (2 l/s) los años 2000. A partir de la década 1980s y hasta 2010, se observa una disminución continua de los niveles de las aguas subterráneas, con un valor mediano (por intervalo de diez años) cambiando desde 0,4 m entre 1990-1980, 0,5 m entre 2000-1990 y 0,6 m entre 2010-2000. Durante este periodo, el valor máximo de la caída de los niveles (por intervalo de diez años) ha ido aumentando igualmente: 8,04 m, 21,25 m y 38,73 m, respectivamente. Entre 2010 y 2020, la caída de los niveles aumentó de manera alarmante (valor mediano: 3,58 m) y ocurrió en casi todos los pozos de observación (95%). Durante esta década, algunos pozos registraron caídas superiores a 40 m (ej: La Ligua: 44,43m, Aconcagua: 48,68m).

Durante las décadas pre-2010, el análisis estadístico muestra que la profundización de los niveles piezométricos tiene una correlación clara con el aumento de los bombeos ($r=0,68$; $p<0,001$), mientras que no es así con la variación de las precipitaciones ($r=0,27$; $p=0,14$). A escala de Chile Central, hemos identificado que los acuíferos comenzaron a estar en un estado de sobreexplotación desde 1988. Entre 2010 y 2020, los niveles piezométricos muestran una correlación significativa con el aumento de los bombeos ($r=0,94$; $p<0,001$) y ausencia de una correlación fiable con la variación de las precipitaciones ($r=0,47$; $p=0,15$).

Si bien se suele proponer la Megasequía como la gatillante de la crisis hídrica, los datos analizados demuestran que la disminución de los niveles piezométricos se debe a una clara sobreexplotación de los acuíferos de Chile Central. La Megasequía sólo llegó a agravar las tendencias ya existentes de deterioro, exponiendo la alta vulnerabilidad de los acuíferos a la disminución de la precipitación. Podemos concluir que actualmente los recursos hídricos subterráneos de Chile Central se encuentran en un estado de sobreexplotación alarmante que ponen en riesgo la seguridad hídrica de esta zona densamente habitada del país. Finalmente, los resultados de este estudio invitan a los tomadores de decisión a no seguir sobreexplotando los acuíferos y a buscar soluciones sostenibles basadas en la ciencia.

Palabras Clave: acuíferos, Chile Central, seguridad hídrica, sobreexplotación.

Financiamiento: - Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) grant no. 19CTIGH-121349 (Centro Avanzado Para Tecnologías del Agua – CAPTA), LD.- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), Fondo de Investigación Estratégica en Sequía grant no. FSEQ210007, LD.- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), ANILLOS TEMÁTICOS grant no. ATE220029, LD.- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), Fondo de Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias (FONDAP) grant no. ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes – CEGA).

Cinemática de cuerpos glaciares cubiertos y rocosos en los Andes centrales chilenos

Karina De Requesens Montiel¹, Javier Ramirez²⁻³, Jaime Ortega²⁻³, Juvenal Letelier¹⁻⁴

- (1) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Avenida Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Matemática, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 851, Edificio Norte, Piso 5, Santiago, Chile
 (3) Centro de Modelamiento Matemático, Departamento de Ingeniería Matemática, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 851, Edificio Norte, Piso 6, Santiago
 (4) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Actualmente, Chile Central enfrenta la Megasequía con un déficit de precipitaciones del 25 al 45% y aumento de 0,5 a 1°C en la temperatura media (Garreaud et al., 2020). Esta situación ha estresado los sistemas acuáticos superficiales y subterráneos, ya que el crecimiento demográfico y económico implica un aumento en la demanda de este recurso (DGA, 2017).

Bajo este escenario, la cuantificación de las reservas de agua presentes en la alta montaña se ha convertido en un problema de interés nacional (Vivero et al., 2021). Los deshielos suministran agua a ciudades y posibilitan la realización de actividades económicas. Sin embargo, estudios ya alertan sobre la disminución en la extensión de glaciares descubiertos (Barcaza et al., 2017), así, entra en discusión la caracterización y monitoreo de crioformas más resilientes como los son los glaciares de roca y cubiertos de detritos. Estos juegan un papel importante como reservas de agua, son indicadores de cambio climático y su degradación puede inducir a geopeligros y afectar el ciclo del agua en alta montaña (Strozzi et al., 2020).

A pesar de lo mencionado, los estudios cinemáticos están restringidos a pocos sitios del país (Strozzi et al., 2020). Por otra parte, adoptan metodologías tradicionales tales como el uso de medidas in situ y técnicas de correlación de imágenes. Los datos in situ entregan resultados precisos, pero tienen varias limitaciones debido a su tiempo de adquisición, al difícil acceso a zonas de alta montaña y altos costos relacionados (Singh et al., 2021). Por otro lado, la correlación de imágenes requiere un riguroso proceso de selección y es computacionalmente costoso e ineficiente (Altena & Kääb, 2017).

En este contexto, en el presente trabajo se evalúan y validan diversas técnicas de análisis avanzado de imágenes satelitales, tales como la Interferometría diferencial de radar (dINSAR) y algoritmos de flujo óptico, con el objetivo de estudiar la cinemática de un glaciar rocoso y uno cubierto de detritos, para luego cuantificar desplazamientos de cuerpos del mismo tipo en Los Andes centrales de Chile (33,5°) desde el 2014 al 2022.

La metodología del estudio se basa en el cálculo de las tasas de deformación vertical y horizontal a partir de imágenes satelitales de radar. Para estimar la deformación vertical se utiliza dINSAR una técnica ampliamente utilizada en las ciencias de la Tierra basada en el cálculo de diferencias de fase de imágenes adquiridas en distintos tiempos. Para la estimación del desplazamiento horizontal, se emplea el método del Flujo Óptico, una técnica que permite estimar el campo de movimiento entre dos imágenes que poseen el mismo brillo. Ambas mediciones son validadas con los datos de terreno obtenidos por la Dirección General de Aguas (DGA) y luego utilizadas para analizar el movimiento de cuerpos en otras áreas.

Los cuerpos glaciares seleccionados para la validación de la metodología corresponden al glaciar cubierto de detritos La Pirámide y un glaciar rocoso sin identificación ubicado en la ladera este del glaciar cubierto. Ambos cuerpos cuentan con mediciones de posicionamiento de crucetas instaladas en su superficie por la DGA. En el caso del glaciar Pirámide se instalaron 10 crucetas en abril del 2021, mientras que el cuerpo rocoso cuenta con 5, instaladas en marzo del 2022.

Cabe destacar que existen diversos algoritmos de flujo óptico, en el presente estudio se utiliza el enfoque de cálculo TV-L1, conocido por su capacidad de preservar bordes y detalles, su robustez ante ruido y discontinuidades, y su capacidad para tratar problemas de iluminación no uniforme (Sánchez et al., 2013). Además, esta técnica ha demostrado tener un bajo costo computacional, ha tenido un mejor desempeño sobre glaciares descubiertos que otras formas de cálculo y su uso sobre glaciares cubiertos no se ha encontrado en la literatura (Vogel et al., 2012).

Una vez calculados los movimientos horizontales y verticales se procede a estimar la cinemática dominante a partir de la obtención de la razón entre el movimiento en pendiente y el descenso del terreno. Este valor se ha utilizado en la literatura para discriminar entre glaciares cubiertos de detritos y glaciares rocosos (Bosson & Lambiel, 2016).

La descripción cinemática de estos glaciares establece los fundamentos para futuras investigaciones que busquen explicar sus movimientos, incluyendo su respuesta a las fuerzas climáticas y caracterizaciones de su estructura interna. Estas permitirán proyectar el comportamiento futuro de los glaciares y evaluar su papel como importantes reservas de agua. En consecuencia, este estudio brinda una valiosa perspectiva para abordar estos temas en investigaciones posteriores, lo que contribuirá al avance del conocimiento en este campo en nuestro país.

Palabras Clave: Glaciares rocosos, Glaciares cubiertos, Cinemática, Percepción Remota.

Financiamiento: Este estudio se enmarca y ha sido financiado por el proyecto FONDEF IDEA I+D ID21110305 "Desarrollo de un sistema de monitoreo de glaciares rocosos y cubiertos de detritos con uso de sensores remotos e inteligencia artificial".

Agradecimientos: Se agradece a la Dirección General de Aguas (DGA) por compartir datos de terreno fundamentales y al Centro de Modelamiento Matemático (CMM) por brindarnos acceso a sus instalaciones y recursos.

Referencias:

- Altena, B., & Kääh, A. (2017). Weekly glacier flow estimation from dense satellite time series using adapted optical flow technology. *Frontiers in Earth Science*, 5, 53.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., . . . Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the andes of chile, south america. *Annals of Glaciology*, 58, 166-180.
- Bosson, J. B., & Lambiel, C. (2016). Internal structure and current evolution of very small debris-covered glacier systems located in alpine permafrost environments. *Frontiers in Earth Science*, 4, 39.
- DGA. (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40, 421-439.
- Sánchez, J., Meinhardt-Llopis, E., & Facciolo, G. (2013). TV-L1 optical flow estimation. *Image Processing On Line*, 2013, 137-150.
- Singh, D. K., Thakur, P. K., Naithani, B. P., & Dhote, P. R. (2021). Spatio-temporal analysis of glacier surface velocity in dhauliganga basin using geospatial techniques. *Environmental Earth Sciences*, 80.
- Strozzi, T., Caduff, R., Jones, N., Barboux, C., Delaloye, R., Bodin, X., . . . Schrott, L. (2020). Monitoring rock glacier kinematics with satellite synthetic aperture radar. *Remote Sensing*, 12.
- Vivero, S., Bodin, X., Fariás-Barahona, D., MacDonell, S., Schaffer, N., Robson, B. A., & Lambiel, C. (2021). Combination of aerial, satellite, and uav photogrammetry for quantifying rock glacier kinematics in the dry andes of Chile (30°s) since the 1950s. *Frontiers in Remote Sensing*, 0, 42.
- Vogel, C., Bauder, A., & Schindler, K. (2012). Optical flow for glacier motion estimation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 359-364.

Estimación del aporte hídrico de glaciares de roca en la subcuenca del río Hurtado, región de Coquimbo, Chile

Felipe Cristian Fuentes Carrasco¹, Cristóbal Machuca del Valle¹, Luis López¹, Paula Olea¹, Cecilia Donoso¹, Miguel Ortiz¹, Roberto Nicolas Merino¹, Oriol Monserrat², Ivo Fustos³, Ben Robson⁴

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

(2) Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

(3) Universidad de la Frontera, Temuco, Chile

(4) Universidad de Bergen, Noruega

La subcuenca del río Hurtado se encuentra en la provincia de Limarí, región de Coquimbo y en ella se encuentra el glaciar El Volcán, correspondiente al glaciar de montaña más austral del norte semi árido de Chile, así como también la mayor cantidad de glaciares de roca en la cuenca el río Limarí. En la literatura tanto nacional (Pino, 2018, Shaffer, *et al.*, 2019, Shaffer & MacDonell, 2022), como internacional (Jones *et al.*, 2019, Shane, J., 2017), existe un conocimiento preliminar sobre el aporte hídrico que significa tanto el agua sólida como líquida que hay presente en estas crioformas (glaciares de roca), en el balance hídrico total de la cuenca, y más aún, encontrándonos en un período de mega sequía (Garreaud, *et al.*, 2019) donde estas reservas de agua constituyen un reservorio natural que por sus características, pueden resistir mejor los crecientes efectos del cambio climático, que está derritiendo los glaciares blancos de montaña a velocidades alarmantes (DGA, Inventario Público de Glaciares (IPG), 2022).

Para lograr estimar el aporte de agua de las crioformas, la metodología utilizada en este estudio consistió, primero en el desarrollo de una cartografía Geológica y Geomorfológica (Merino *et al.*, en prep. y Fuentes *et al.*, en prep.), para luego una vez seleccionado las crioformas de interés, realizar estudios específicos. En particular se seleccionaron dos glaciares de roca para realizar la metodología correspondientes al glaciar de roca El Ternerero Alto (CL104500076@ del IPG2022.v2) y el glaciar de roca ubicado en la quebrada Amarilla (CL104500149@ del IPG2022.v2)

Mediante el uso de tecnologías recientes como es el uso de equipos aéreos no tripulados (Drones) para la creación de modelos 3D de alta resolución, combinada con equipos de GPS Diferencial para ajustar los modelos a resoluciones de error centimétricas, para luego mediante la comparación de modelos obtenidos con una diferencia temporal aproximada de 1 año, se obtenga velocidad y la diferencia de volumen en los glaciares de roca y así correlacionar el agua equivalente que se derritió en estos cuerpos con las estimaciones de agua equivalente que estaría presente en los glaciares de roca de la subcuenca del río Hurtado, que son parte del Inventario Público de Glaciares de la DGA (2022).

Adicionalmente se utilizaron metodologías complementarias, como el análisis hidrogeoquímico (de elementos mayores, menores y traza) e isotópico (de oxígeno 18 y de deuterio), principalmente en las lagunas supraglaciares, esteros, un glaciarete y colectores de precipitación, esto, como parte del estudio realizado por SERNAGEOMIN, denominado Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Limarí, (Fuentes *et al.*, en prep.).

Por otra parte, se realizaron cinco perfiles gravimétricos, que permitieron estimar el espesor de las crioformas, las que oscilan entre los 70-150 m de espesor (el que es un espesor mayor que el estimado mediante Chen & Omura, 1990, en DGA, 2022), y un análisis de imágenes satelitales, utilizando la metodología de interferometría diferencial de radar, con dispersores permanentes (Dinsar y PSI) para determinar la magnitud y la velocidad de desplazamiento de las crioformas. Éstas se encuentran en un rango de -50 a 70 cm de desplazamiento promedio anual, con una velocidad media anual de -10 a 15 cm/año. Las diferencias de valores entre el desplazamiento y la velocidad tienen relación con zonas donde se registran mayores movimientos versus otras con movimientos más lentos.

Finalmente, la combinación de las técnicas utilizadas ha permitido estimar el aporte hídrico de las crioformas, el que posee un rango promedio de 9,47 a 15 l/s al año de aporte glaciar. Esto equivale entre un 1,2 a 2,4% del balance hídrico de la cuenca del río Limarí.

Palabras Clave: Glaciares de roca, Aporte hídrico, Coquimbo, Hurtado, Criosfera.

Agradecimientos: Este trabajo cuenta con el apoyo del Sernageomin y también es parte de la tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención Geología de la U. de Chile, asociada a una beca de magister (ANID).

Referencias:

- Dirección General de Aguas (DGA). 2022. Metodología del Inventario Público de Glaciares. Realizado por: Unidad de Glaciología y Nieves. S.D.T. N°447. 21 p. Santiago.
- Fuentes, F.; López, L.; Cabrera, N.; Machuca, C. En preparación. Hidrogeología de la cuenca del río Limarí, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Hidrogeología 8: 160 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Garreaud, R.D.; Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H.H.; Veloso-Aguila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*. DOI: [10.1002/joc.6219](https://doi.org/10.1002/joc.6219).
- Jones D.B; Harrison, S.; Anderson, K.; Whalley, W.B. 2019. Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Reviews* 193, 66-90. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.001>.
- Merino, R.N.; Ortiz, M.; Coloma, F. En preparación. Geología del área Cordillera de Doña Rosa-Paso de Los Azules, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Santiago.
- Pino, C.A. 2018. Estudio geomorfológico glacial y periglacial asociado a la evolución de glaciares rocosos en la alta cuenca del río Cochiguás, región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago.
- Shaffer, N.; MacDonell, S.; Réveillet, M.; Yáñez, E.; Valois, R. 2019. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change* 19: 1263-1279 p. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>.
- Shane, J.H. 2017. The Hydrogeology of a Rock Glacier and its effect on stream temperature. Thesis for the degree of Master of Science. University of Calgary, Alberta, Graduate program in Geology and Geophysics. 181 p.

Monitoreo y estimación del aporte hídrico de los glaciares de rocas

Felipe Ugalde Peralta¹, **Cedomir Marangunic Damianovic¹**, Ashley Apey Freire¹

(1) Geoestudios, Los Aromos 3371, San José de Maipo, Chile

En Chile, con miles de glaciares de rocas y glaciares cubiertos desde la frontera con Perú hasta el extremo austral, hay más de medio siglo de experiencia en el estudio de estas crioformas. Sin embargo, aún no se ha alcanzado un consenso claro para distinguir el modelo de origen de estos glaciares, es decir, si se formaron por procesos glaciogénicos o criogénicos. Además, el entendimiento del aporte hídrico que estos glaciares brindan a sus respectivas cuencas es más bien pobre. De modo similar, es escasa la precisión en el empleo de la terminología que los describe como glaciar cubierto, de rocas, transicional, activo o inactivo y relicto.

Según el Inventario Público de Glaciares 2022, el 38,5% de la superficie glaciar entre la Región de Atacama y la Región de O'Higgins corresponde a glaciares de rocas. Pero entendiendo por glaciar de rocas todos aquellos glaciares con el 90% o más de su superficie cubierta por detritos, vale decir que incluye un número importante de glaciares cubiertos que se están transformando o se han transformado a glaciares de rocas pero que en el Inventario Público se clasifican como de valle, de montaña o glaciarete (ejemplo los glaciares Rinconada Oeste-Monolito, Altar Sur, Del Rincón y Littoria en los Andes centrales de Chile), resulta que, aproximadamente, el 44% de la superficie glaciar en este territorio corresponde a glaciares de rocas, principalmente temperados.

Por otra parte, la tasa de fusión en los glaciares de rocas "activos" (de frente abrupto y velocidades de movimiento en superficie del orden 0,2 a 1,0 m/año o más) es del orden de 6 a 12 cm/año equivalente en agua, mientras que en los "inactivos" (hielo casi exclusivamente intersticial, sin deformación, con velocidades de movimiento inferiores a 0,1 m/año y una cubierta de detritos más potente) esta tasa es de milímetros a pocos centímetros por año. De esta tasa aproximadamente 2 a 3 mm/año es debido al calor geotérmico y otro tanto al calor generado por la fricción sobre el lecho en el caso de los glaciares "activos", el resto a la fusión en la superficie del hielo y dependiendo significativamente de la conductividad térmica (en general con un valor del orden de 0,28 a 0,36 W m⁻¹ K⁻¹) y espesor del detrito que lo cubre (en promedio del orden de 2,6 m en glaciares "activos" y 3,5 o más metros en "inactivos"). Así, el aporte hídrico de los glaciares de rocas "activos" a sus cuencas resulta del orden de 1.500 m³/año/hectárea y de 200 m³/año/ha el de los "inactivos", reduciéndose este valor hasta 30 m³/año/ha hasta la total extinción del hielo.

Considerando lo anterior y para efectos de estimar el aporte hídrico de los glaciares de rocas, la sola discriminación entre glaciares "activos" e "inactivos", basada en características del frente y las velocidades de movimiento, permite una primera aproximación. Para este mismo propósito importa monitorear el balance de masa geodésico en términos anuales, el espesor del detrito superficial y evolución temporal de su cobertura. Además, se vuelve necesario medir la conductividad térmica de la cubierta de detritos cuando importa realizar un balance de energía empleando parámetros meteorológicos.

Palabras Clave: Glaciar de rocas, Glaciar cubierto, Glaciar rocoso, Aporte hídrico, Glaciología.

Efecto de la estructura interna en el trazado hidrológico de un complejo glaciar en los Andes semiáridos (30°S)

Gonzalo Navarro¹⁻², Remi Valois³, Shelley MacDonell²⁻⁴, Giulia de Pasquale², Juan Pablo Díaz⁵

(1) Universidad de La Serena, La Serena, Chile

(2) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), La Serena, Chile

(3) Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes—EMMAH, Université de Avignon, Avignon, France

(4) Waterways Centre for Freshwater Management, University of Canterbury and Lincoln University, Christchurch, New Zealand

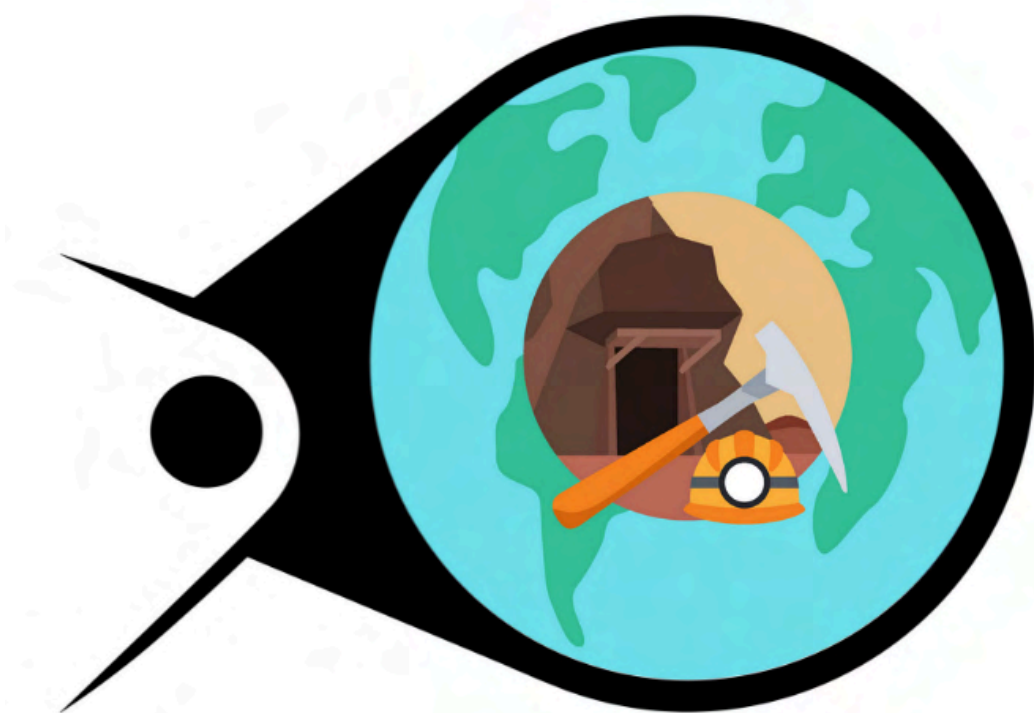
(5) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructura y Geotécnica, Santiago, Chile

Los glaciares rocosos son la geoforma (peri)glacial más abundante de los Andes Semiáridos, cubriendo cerca de tres veces el área ocupada por los glaciares blancos. Su rol hídrico es aún incierto, por lo que es importante definir su papel en la producción, transferencia y almacenamiento de agua dentro del sistema hidrológico de las cuencas de cabecera. Estos procesos son particularmente complicados y desconocidos en complejos glaciares, donde exista una yuxtaposición de diversas geoformas glaciares y los cuales son comunes en regiones como los Andes Semiáridos y los Himalayas. La identificación de la distribución y abundancia de los materiales que la componen ayuda a determinar cómo será transferida el agua a través de esta y aguas abajo. El presente estudio busca determinar cómo la estructura interna de un complejo glaciar cubierto controla su enrutamiento hidrológico, usando una serie de mediciones geofísicas (tomografía de resistividad eléctrica, georradar y tomografía de refracción sísmica) en el complejo glaciar Tapado (30°S). Este trabajo se enfocó en la conexión entre el glaciar cubierto y el glaciar rocoso activo del complejo. Los resultados muestran que el glaciar cubierto tiene una capa detrítica relativamente delgada que aumenta su espesor glaciar-abajo, conectándose con la capa activa del glaciar rocoso. Se evidencia además que el glaciar rocoso tiene más vías de enrutamiento hídrico dada su estructura heterogénea, permitiendo la existencia de flujos internos que podrían conectar aguas supra-glaciales con sub-glaciales y conducir las aguas abajo. Dada la mayor capacidad de transmitir flujos verticales y horizontales, el glaciar rocoso fomentaría procesos de infiltración. Este trabajo refuerza el valioso uso de los métodos geofísicos en la exploración de la estructura interna de las geoformas cubiertas, y pone en manifiesto como un clima en calentamiento, y los consecuentes procesos paraglaciales, impactará el sistema hidrológico de cuencas de cabecera no sólo en términos de reservas de agua sino también de transferencia de aguas.

Palabras Clave: glaciar rocoso, glaciar cubierto, hidrología de montaña, transferencia de agua, geofísica.

Financiamiento: Beca de Doctorado Nacional/Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)/2021-21210918; ANID-CENTROS REGIONALES R20F0008; Universidad de La Serena; Centro de Estudios Avanzados.

ÁREA TEMÁTICA 4: RECURSOS MINERALES



El Rol de Sernageomin en el conocimiento de minerales estratégicos en Chile

Braulio Aguila¹, Guillermo López¹

(1) Sernageomin, Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Avenida Santa María 104, Santiago, Chile

La necesidad de cambiar la matriz energética basada en el uso de combustibles fósiles hacia energías limpias que no generen gases de efecto invernadero (GEI), denominada mundialmente Transición Energética, y a nuevos requerimientos en desarrollo tecnológico para lograr ese cambio, sumado a nuevas necesidades de la sociedad actual, han generado una búsqueda global de minerales o elementos específicos para satisfacer esta creciente demanda. Estos minerales, tanto metálicos, como rocas y minerales industriales, son claves para la fabricación de componentes tecnológicos complejos, lo que abrió la discusión sobre la obtención y el abastecimiento futuro de las materias primas.

La creciente demanda ha obligado a naciones industrializadas a buscar nuevas fuentes seguras de suministro para estos minerales, lo que ha generado una intensa exploración de nuevos depósitos como fuente primaria de abastecimiento, como también el desarrollo de nuevos procesos para su recuperación desde concentrados y residuos del proceso minero (botaderos, tranques de relave, entre otros). Actualmente existe una concentración de países que producen y procesan gran parte de los Minerales Críticos definidos por las grandes potencias occidentales (EE. UU., UE, Canadá, Australia), donde China domina la industria del procesamiento y es fuente mayoritaria de varios de éstos, como por ejemplo tierras raras, wolframio y vanadio, lo que aumenta la criticidad de estos minerales por condicionantes geopolíticas y económicas.

Chile tiene una oportunidad única en ese sentido, ya que es un país con una industria minera fuertemente desarrollada, referente a nivel mundial y que explota varios de estos Minerales Críticos. Esos recursos son estratégicos para Chile por el alto impacto socioeconómico que tiene la industria minera, pero que necesita potenciar el conocimiento de otros elementos, definiéndose como una oportunidad adicional. Chile está llamado a posicionarse como un país fuente de estos elementos, con una minería responsable social y ambientalmente, logrando ser un actor clave en la transición a energías limpias, por sobre el uso de hidrocarburos y fuentes de energía convencional.

De acuerdo con lo anterior, el Ministerio de Minería, en línea con la Política Minera 2050 (MM, 2022), ha propuesto un listado de 13 Minerales Estratégicos definida en base a la demanda de Minerales Críticos, el potencial geológico del territorio, la producción nacional, y proyectos de exploración y la recuperación desde la minería secundaria (Pasivos Ambientales Mineros) de tales minerales. Esta lista está constituida por el cobre, litio, cinc, elementos del grupo del platino (PGE), cobalto, manganeso, molibdeno, tungsteno, tierras raras, vanadio, baritina, titanio y renio, y es utilizada como referencia y punto de partida para estudios de potencialidad que realizará el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), sin dejar de lado otros elementos que resultan con anomalías de interés.

En concreto, Sernageomin está generando una línea de trabajo que incluyan capítulos exclusivos de Minerales Estratégicos en la cartografía regular de mapas metalogénicos para potenciar la exploración minera de estos elementos. Lo anterior se traduce en información enfocada en anomalías de elementos estratégicos y una señal geoquímica ampliada de los depósitos minerales estudiados, así como también la incorporación de las diferentes capas de información obtenidas del Sistema de Información Geológica de Exploración (SIGEX) y la caracterización de fases minerales que contengan minerales estratégicos. En esta línea de trabajo, Sernageomin pretende innovar definiendo límites para considerar anomalías de estos elementos estratégicos, posibilitando así una exploración mineral más focalizada de dichos elementos. Además, se pretende incluir la aplicación de machine learning para la definición de áreas prospectivas potenciales de elementos estratégicos.

Actualmente se cuenta con casos de estudio en los mapas metalogénicos de la región de Coquimbo y Valparaíso (Arredondo et al., 2017, Ortega et al., 2021), levantados por la Unidad de Recursos Minerales de Sernageomin, que incluye el análisis geoquímico de muestras mineralizadas de diferentes tipos de depósitos minerales de ambas regiones. En el caso particular de la región de Coquimbo se enfoca en el análisis de contenidos de cobalto en depósitos tipo IOCG e IOA y las fases minerales que contienen este elemento estratégico a través de microscopía electrónica de barrido. Este ejemplo práctico permite explicar de buena forma el valor agregado y potencialidad que puede tener una franja metalogénica en particular con enfoque en minerales estratégicos, focalizado en particular en la pequeña y mediana minería del país.

Keywords: (1) Críticos, (2) Estratégicos, (3) Energía, (4) Sernageomin.

Referencias:

- Arredondo, C.; Moscoso, R.; Prieto, X.; Ortega, R.; Carrasco, R.; Vivallo, W.; Mateo, L.; Pantoja, G.; Ulloa, M.; Ercilla, O.; Ridelle, E. 2017. Depósitos Minerales de la Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie de Recursos Minerales y Energéticos 35: 134 p., 2 mapas escala 1:500.000, 1 CD con anexos. Santiago.
- Ortega, R.; Moscoso, R.; Arredondo, C.; Aguila, B.; Mateo, L.; Pantoja, G. 2021. Depósitos metalíferos de la región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 36: 219 p., 1 mapa escala 1:500.000. Santiago.
- Ministerio de Minería de Chile (MM). 2022. Política Nacional Minera 2050. <https://www.politicanacionalminera.cl/>

Geothermal, key to reducing the water and carbon footprints of lithium mining in the salt flats

Mohammad Ayaz Alam¹

(1) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Geoespacial y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Enrique Kirberg Baltiansky n° 03, Estación Central, Santiago, Chile

The environmental concerns associated with lithium (Li) mining in the salt flats are primarily due to the prevalent water-intensive mining practices that urgently need innovation, considering the irreparable damage to groundwater resources and wetland ecosystems. Even the mining methods based on "direct lithium extraction" (DLE) technologies that do not involve evaporation ponds but rather a reinjection of the brine is not environment-friendly, although the National Lithium Strategy (NLS) considers that they "ensure the least possible socio-environmental impact on the territories". While the problem with Li mining in the salt flats using such ponds is water loss via evaporation, the problem with direct extraction is constant pumping and reinjection of Li-enriched aquifer disturbing the salt flat, groundwater, and groundwater-dependent wetland ecosystems. Li mining must recognize the complex geology of the salt flats, as they are not just composed of brine. One such aspect is the presence and role of geothermal systems in the salt flats. Geothermal water circulating through the brine horizons has the potential to concentrate Li in specific horizons that can be selectively extracted with minimum effect on the fragile hydrologic system (viz., aquifers, wetlands) of the salt flats.

The Li-enriched brine formation depends on Li mass flux, exposure of the source rocks to leaching, drainage in the closed basins, and the level of geothermal activity. The dynamic environment of Li formation in the salt flats forms brines of varying Li concentration interspersed within the clastic sediments filling the basin and suggests that economic brines, i.e., with elevated Li concentration, might exist well below the aquifers with lower Li concentrations. In addition, heating by the underlying geothermal water could induce circulation of the brines in a portion of the basin within hydrologically connected areas, leading to the development of a heterogeneous distribution of Li in the salt flats, vertically and laterally. This would be possible because conductive heating by underlying geothermal water could induce circulation (analogous to convective overturn) of basin brines within hydrologically connected regions. Accordingly, this geothermally induced brine circulation may develop a heterogeneous subsurface Li distribution in closed basins, where geothermal waters could be instrumental in forming Li-enriched horizons in subsurface brine. Deciphering and modeling the latter will form a strong and tangible basis for developing environment-friendly methods for Li mining that will have negligible influence on the groundwater and wetland ecosystems using drilling technologies prevalent in the hydrocarbon industry for extracting particular sedimentary horizons.

Despite vouching for and being biased toward the use of DLE in Li mining, NLS sees "an opportunity to advance in terms of upstream technological development in production". So, beyond this misconception in the knowledge vision of NLS regarding innovation in the area of Li mining, there is a scope and room for geothermal, as it is an integral part of all the salt flats. There is no salt flat in Chile or other parts of the world that does not have a present-day (active) or paleo-geothermal system, which deserves a holistic geoscientific study of the salt flats through field and laboratory investigations involving integrated geological, geochemical, and geophysical studies leading to conceptual and numerical models validated by exploratory drilling. The expected results of such studies in different salt flats of the country will help understand the role of geothermal systems in forming economic Li deposits that could be selectively mined sustainably.

In the meantime, even if DLE technologies that are being developed and tested at various salt flats in the country are fully implemented shortly, thanks to the push by the Chilean Government, there remains a concern about their environmental footprints. Some of these technologies involve brine heating up to 80°C for better Li recovery, which requires energy and freshwater with considerable water and carbon footprints. Thermal water from geothermal systems in the salt flats can help reduce such footprints through the use of thermal water in the extraction process; moreover, recovering Li from thermal water using DLE technology could be an added benefit. Even the required electricity could be generated using low-enthalpy binary power plants. Further, DLE-backed Li mining projects can benefit from the proven experience of the geothermal industry in used brine injection (after Li extraction). So, in a nutshell, the role of the geothermal systems present in the salt flats cannot be overlooked while developing sustainable Li mining methods.

Keywords: Lithium, Geothermal, Salar, Environment, Sustainability.

Financing: DIUDA Regular 22401 (Universidad de Atacama).

Minerales críticos: oportunidad para pensar en Chile

José Cabello Lechuga¹

(1) Centro de Estudios de Minerales Estratégicos y Críticos de Chile-CEMEC

El término "**minerales críticos**" se utiliza para referirse a minerales de gran importancia económica para una industria, país o área geográfica en particular y que están en riesgo de escasez de suministro. Muchos de estos minerales están experimentando un rápido crecimiento de la demanda y son claves para el desarrollo de la economía mundial.

Las tecnologías avanzadas, desde satélites hasta teléfonos celulares, requieren una variedad de minerales específicos con propiedades químicas y físicas únicas, que no fueron ampliamente utilizados o considerados esenciales para la fabricación hace apenas unas décadas.

Se utilizan en aplicaciones que incluyen la salud humana, productos farmacéuticos, tecnologías ambientales como baterías de iones de litio, electrónica de consumo, seguridad vial, industria química, siderúrgica y construcción, defensa y exploración espacial. Estos minerales no sólo son "críticos" para sectores claves de la industria y aplicaciones futuras, sino también para el funcionamiento sostenible de la economía mundial y para sus aspiraciones de convertirse en carbono neutral para 2050.

La producción de muchos minerales de alta demanda se concentra en unos pocos países, lo que crea un mayor riesgo de aumentos de precios e interrupciones en la oferta.

Un número significativo minerales considerados críticos (entre ellos tierras raras, wolframio, litio y cobalto) experimentará mayor demanda en los próximos 20 años, mientras que los "convencionales" (cobre, oro, plata, hierro, molibdeno, por ejemplo) recibirán un impulso adicional a medida que tomen mayor presencia en transiciones a un desarrollo sostenible y digital, con presencia importante de energías renovables.

Todo lo anterior sugiere que, en Chile, donde la minería es una actividad económica de primera importancia aparece como deseable tener buena información al respecto para identificar cómo nuestro país debería beneficiarse.

En el **2014**, la Unión Europea hizo un estudio que identificó unos 46 metales y minerales que consideró críticos para su industria. Algo similar puede decirse de otros países industrializados como Japón, China y Estados Unidos.

Tomando como ejemplo la Unión Europea procedí a revisar que metales o minerales del listado de sus Minerales Críticos tenemos en Chile: Resultó que **actualmente nuestro país es productor de 20 de ellos y adicionalmente tiene en sus yacimientos otros 6**, que también podrían ser producidos. Por otro lado, parece haber una ausencia de una política al respecto a nivel estatal.

Dada nuestra capacidad como productores de minerales a escala mundial, el tema de los Minerales Críticos debería ser estudiado, evaluado y considerado para ser aprovechado por nuestro país.

Nuestra privilegiada geología nos pone en situación aventajada como poseedores y productores de minerales críticos para varios países industrializados que dependen de estas materias primas.

Chile debe tener una buena comprensión de sus desafíos y debería trabajar activamente en estos temas. Si bien los principales retos mencionados para la futura minería chilena son productividad, energía, uso eficiente del agua, innovación, capacitación de capital humano y comunidades, habría que agregar el tener un mejor inventario de todos nuestros recursos minerales buscando sobre todo identificar aquellos minerales que otras economías consideran críticos para sus industrias.

Con un buen conocimiento de los minerales críticos se deberían también evaluar muchas minas antiguas hoy paralizadas y nuestros abundantes residuos originados por la minería: relaves, desmontes y escorias. Muchos de los cuales tienen varios metales y minerales de este grupo especial que ahora podríamos aprovechar. La oportunidad está identificada. Ahora tenemos que actuar para aprovecharla.

Palabras Clave: Minerales Críticos, Chile, Minería.

Financiamiento: CEMEC.

Agradecimientos: CEMEC.

Caracterización mineraloquímica de escorias de cobre de la Fundición Hernán Videla Lira (FHVL)– ENAMI: exploración “in-situ” de elementos valiosos y contaminantes

Marcela Díaz Rivera¹, Germán Velásquez¹, Stefano Salvi²

(1) Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), Universidad de Concepción, Chile

(2) Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse, CNRS, GET, IRD, OMP, 14 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

Chile se ha posicionado como principal productor de cobre (Cu) a nivel mundial, dado el aumento del requerimiento de este metal como materia prima para la electromovilidad (1). El circuito metalúrgico para la recuperación del Cu de las menas de sulfuros considera las etapas: flotación, fundición y refinamiento (2), obteniendo Cu blíster como producto final y generando residuos como relaves y escorias. En la etapa de fundición se generan principalmente dos productos: mate y escorias.

Las escorias son una de las principales fuentes de desechos en los depósitos de relave, estimándose 2,2 toneladas de este material por cada tonelada de Cu producido (3). Además, la presencia de elementos contaminantes son un potencial riesgo para la salud de la población y el medioambiente (4). Sin embargo, las escorias pueden contener concentraciones de elementos valiosos contribuyendo a la economía circular, mediante el reciclaje de metales prolongando así la vida útil de los yacimientos (5). Según trabajos anteriores, las escorias de Cu de la FHVL alcanzan leyes residuales de Cu de 0,75%, destacándolas como un importante activo metalúrgico.

En este estudio se presenta la caracterización de una muestra de escoria de Cu de la FHVL para evaluar la presencia de metales valiosos, como Cu, Fe, Ti, Ag, Co y elementos contaminantes, principalmente As, y determinar la fase mineral huésped para los elementos de interés. Finalmente se discute la posibilidad de utilizar las escorias como fuente secundaria de metales valiosos y/o como pasivo metalúrgico para la construcción.

Metodología

Se estudió una muestra de escoria de Cu (5 kg) como proyecto piloto. A la muestra se le realizó una caracterización operacional, que consistió en:

- descripción petrográfica por microscopía óptica de luz transmitida y DRX, para establecer las fases minerales
- ensayos químicos por FRX y AAS para determinar las leyes de los elementos
- caracterización mineraloquímica utilizando las técnicas de microsonda electrónica (EMPA) y LA-ICP-MS, para determinar en qué fase mineral está cada metal de interés.

Resultados

1. Caracterización operacional:

- Petrografía: se identificaron 3 fases minerales:

- silicatada* con cristales de fayalita, de hábito prismático, textura esquelética, embebidos en una matriz de vidrio criptocristalino
- oxidada* con cristales de magnetita, de hábito octaédrico, textura esquelética y euhedral y tamaño inequigranular
- de sulfuros* con partículas de mate, de forma esferoidal y de tamaño inequigranular, las partículas más pequeñas ($\leq 10\mu\text{m}$) presentan un color rojo-anaranjado, por la presencia de Cu nativo y las más grandes ($10\text{--}200\mu\text{m}$) son de color gris con rojo-anaranjado.
 - DRX: en el difractómetro se pudieron identificar tres minerales según los peak característicos: fayalita (74.5%), magnetita (15.2%) y hedenbergita (10.3%). Se determinó una cristalinidad de 39.5% correspondiente a la fase de vidrio. No se pudo determinar la mineralogía de la fase de mate.
 - FRX y AAS: se obtuvo una semicuantificación de la concentración de los elementos mayoritarios, destacando: SiO_2 (28.34wt%), SO_3 (0.88wt%), TiO_2 (0.63wt%), Fe_2O_3 (53.64wt%), CuO (0.96wt%), As_2O_3 (0.11wt%), y trazas de Ag (35 ppm) por AAS.

2. Caracterización mineraloquímica:

- EMPA: se determinó la concentración “in-situ” de elementos mayoritarios para cada fase mineral:

- fase silicatada: fayalita* ($n=22$): $\text{FeO}_{\text{total}}$ ($66,6\pm 0,7\text{wt}\%$), SiO_2 ($29,8\pm 0,5\text{wt}\%$), MgO ($2,5\pm 0,4\text{wt}\%$), CaO ($0,72\pm 0,3\text{wt}\%$), MnO ($0,29\pm 0,04\text{wt}\%$); y *vidrio* ($n=17$): SiO_2 ($48,5\pm 1,3\text{wt}\%$), Fe_2O_3 total ($19,7\pm 2,9\text{wt}\%$), Al_2O_3 ($16\pm 1\text{wt}\%$), CaO ($9,8\pm 1,7\text{wt}\%$), Na_2O ($3,7\pm 0,5\text{wt}\%$), K_2O ($3,1\pm 0,3\text{wt}\%$), TiO_2 ($0,3\pm 0,1\text{wt}\%$)
- magnetita* ($n=16$): Fe_2O_3 total ($92,5\pm 1,0\text{wt}\%$), Al_2O_3 ($6,9\pm 0,2\text{wt}\%$), TiO_2 ($2,9\pm 0,3\text{wt}\%$), MgO ($0,5\pm 0,1\text{wt}\%$)
- mate* ($n=16$): $\text{Cu}=71,5\text{wt}\%$ ($71,3\text{--}74,0$); $\text{S}=22,0\text{wt}\%$ ($19,9\text{--}23,5$); $\text{Fe}=5,8\text{wt}\%$ ($3,3\text{--}10,5$); $\text{As}=0,6\text{wt}\%$ ($0,3\text{--}1,9$)

El contenido de Ag y Co en todas las fases está por debajo del límite de detección (0,1wt%), mientras que el As (LoD=0,1wt) fue detectado sólo en la fase mate.

- LA-ICP-MS: se determinó las concentraciones “*in-situ*” de elementos trazas de interés en la fase silicatada y la mate, obteniéndose:

a) *fase silicatada* (n=10): As=133,6±68,9ppm; Co=86,2±6,3 ppm y Ag=1,1±0,7 ppm

b) *mate* (n=5): Co=613,4±12,8ppm y Ag=1.107±409 ppm

Conclusiones

Las escorias estudiadas contienen elementos valiosos que pudieran ser reciclados: **Cu** contenido en la mate; **Ti** principalmente en la magnetita; **Fe** en las magnetitas y en la mate; **Ag** principalmente en la mate y **Co** principalmente en la mate. El As, elemento contaminante, se concentra principalmente en la mate; con lo cual, la extracción de la mate y la magnetita por flotación y métodos magnéticos, respectivamente, permitirían recuperar los metales de interés económicos y liberar el As a la fase silicatada, la cual pudiera ser (re)utilizada como material industrial.

Palabras Clave: escoria de cobre, mineraloquímica, LA-ICP-MS, microsonda electrónica, elementos valiosos y contaminantes.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Instituto GEA, de la UdeC, al Laboratoire (GET) y al Centre de Microcaractérisation Raimond Castaing, ambos en Francia.

Referencias:

- Phiri, T.C, Singh, P., Nikoloski, A. N. (2022). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part I, Minerals Engineering, Volume 180, 2022, 107474, ISSN 0892-6875.
- Davenport, W.G.L., et al., (2011). Extractive Metallurgy of Copper (5th edition). Chemical, Petrochemical & Process. Elsevier, pp. 1–481.
- Gorai, R.K. Jana, and Premchand. (2003). Characteristics and utilization of copper slag—a review. Resources, Conservation and Recycling, vol. 39, 2003, pp. 299-313.
- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. Applied Geochemistry, 57, 236-266.
- Lebre, E., Corder, G., Golev, A. (2017). The role of the mining industry in a circular economy: A framework for resource management at the mine site level. J. Ind. Ecol. 21 (3), 662–672.

Recursos Minerales, Medioambiente y Sociedad: las Rocas y Minerales Industriales Ambientales

Aníbal Gajardo Cubillos¹, Rodrigo Carrasco Olguín²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Comité Editor, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Unidad de Recursos Minerales, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

INTRODUCCIÓN

Las Rocas y Minerales Industriales (RMI) constituyen una amplia gama de *minerales, rocas y sedimentos*, y también algunos materiales sintéticos, que son utilizados como *materia prima y/o aditivos*, previamente sometidos a *procesamiento*, en la elaboración de *insumos y productos finales* con valor agregado, en diversas *actividades productivas y de servicio*, aprovechando sus *propiedades físicas y/o químicas*.

Un número importante de las RMI representan recursos minerales insertos en las necesidades y proyecciones de una era de economía global y desarrollo sustentable, debido a que se utilizan en la prevención, reducción y remediación de daños ambientales que afectan o pueden afectar a las personas individualmente o en comunidad, así como a la sociedad en su conjunto., y, por ello, son denominadas Rocas y Minerales Industriales Ambientales.

Las RMI Ambientales pueden dividirse en dos categorías:

- *RMI de Aplicación Directa*: aquellas cuya aplicación para un determinado beneficio ambiental se realiza sin procesos productivos intermedios.
- *RMI de Aplicación Indirecta*: aquellas que se aplican como materia prima o aditivo, en la elaboración de un producto intermedio o final, utilizado para beneficiar el ambiente y/o proteger la salud y bienestar de las personas.

RMI AMBIENTALES DE APLICACIÓN DIRECTA

Se consideran los siguientes ámbitos para estas RMI:

1.- Purificación del aire: Las RMI ambientales actúan principalmente abatiendo por reacción química las sustancias contaminantes, previo a su emisión a la atmósfera, o absorbiendo y captando emanaciones gaseosas de distinto origen, que puedan afectar a las personas que trabajan en las instalaciones que las generan: *caliza, sulfato de sodio, yeso, zeolitas*. Asimismo, contribuyen eficientemente a la desodorización de plantales de crianza animal y de lechos de mascotas, con el correspondiente beneficio a nivel industrial y doméstico: *bentonita, sepiolita, zeolitas*.

2.- Tratamiento de aguas: Las RMI ambientales intervienen por efecto físico y/o químico para el tratamiento de aguas de distinta naturaleza, en forma previa a su disposición final o reutilización, y especialmente de aquellas destinadas al consumo humano e industrial: *alumbres, arena sílicea, bentonita, caliza, carbonato de sodio, cloruro de sodio, diatomita, granate, perlita, sulfato de sodio, zeolitas*.

3.- Acondicionamiento de suelos: Las RMI ambientales participan en la recuperación y acondicionamiento de suelos degradados utilizados para cultivos de diferente tipo y para crianza animal, que han sufrido los efectos de erosión, acidez y sobreexplotación: *arcilla común, bentonita, caliza, perlita, pumicita, yeso*.

4.- Disposición de Residuos Sólidos: Las RMI ambientales se emplean para acondicionar terrenos receptores de residuos, como rellenos sanitarios, sea como sellantes o como barreras de fluidos contaminantes, previniendo o impidiendo la contaminación de acuíferos y de suelos destinados a cultivos para consumo humano: *arcillas especiales, bentonita, sepiolita, zeolitas*.

RMI AMBIENTALES DE APLICACIÓN INDIRECTA

Los ámbitos de aplicación de estas RMI son los siguientes:

1.- Industria manufacturera: Las RMI ambientales se utilizan como decolorantes, absorbentes, anticorrosivos, cargas, pigmentos y extendedores para la elaboración de diferentes productos finales de amplio y permanente y creciente uso por la sociedad, entre las cuales se mencionan:

- *Decolorantes y Absorbentes Industriales*: *bentonita, sepiolita, zeolitas*.
- *Anticorrosivos Industriales*: *basalto*.
- *Cargas industriales resistentes al fuego, la energía eléctrica y la corrosión*: *mica*.
- *Pigmentos y extendedores naturales*: *caliza, caolín, talco, yeso*.
- *Baterías para electromovilidad*: *litio*.

2.- Agroindustria: Las RMI ambientales se utilizan, esencialmente, como filtrantes y captadores de toxinas en diferentes productos alimenticios, contribuyendo a la salud y bienestar de la sociedad.

- *Filtrantes de alimentos líquidos*: *arena sílicea, diatomita, perlita*.
- *Captadores de toxinas en alimentos*: *bentonita, zeolitas*.

3.- Construcción y obras viales: Las RMI ambientales constituyen materia prima en la elaboración de aislantes, sustitutos y cementos especiales, que preservan la salud e incrementan la seguridad de la población.

- *Aislantes térmicos y acústicos para construcción y obras viales*: *arcilla expandida, basalto, diatomita, perlita, pizarra, pumicita*.
- *Sustitutos del asbesto*: *arena sílicea, cuarzo*.
- *Materia prima para cementos especiales*: *caliza, pumicita*.

Palabras Clave: RMI ambientales, medioambiente, sociedad.

Salares andinos del norte de Chile: Potenciales fuentes de litio e impactos al medio ambiente

Aníbal Gajardo Cubillos¹, Rodrigo Carrasco Olguín², Nicolás Cádiz Trejos²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Comité Editor, Av. Santa 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Unidad de Recursos Minerales, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Los salares y lagunas del norte de Chile se localizan en las regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá, de Antofagasta y de Atacama, entre los 18 y 27°S (Figura 1), distribuidos en un área de unos 250.000 km², desde los 700 m s.n.m. en el oeste hasta casi 5.000 m s.n.m. en el este. Los salares corresponden a depósitos salinos continentales generados debido a altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación, y están compuestos, principalmente, por costra salina, salmuera y fracción clástica, salvo aquellos conformados únicamente por costra, como es el salar Grande en la región de Tarapacá.

Según su ubicación de oeste a este los aproximadamente 60 salares y lagunas salinas conocidos en este territorio (Figura 1), que en conjunto contienen sales de Li, K, B, Mg, Na y Ca, principalmente, han sido clasificados según Vila (1986) en: a) salares de la cordillera de la Costa, como el salar Grande constituido en más de un 96% por halita (NaCl); b) salares de la depresión Intermedia, como Bellavista y Pintados con importantes concentraciones de sulfato de sodio (Na₂SO₄); c) salares pre-andinos, Atacama, Pedernales y Maricunga, que constituyen los salares de principal interés por Li, K y B en el país; y d) salares andinos ejemplos de los cuales son los salares de Aguas Calientes Centro, Tara, Gorbea, La Isla, Las Parinas y Pajonales, de potencial interés por Li y K (Troncoso et al. 2013). De estos aproximadamente 60 salares y lagunas salinas, del orden de 40 corresponden a salares pre-andinos y andinos, que son los únicos con factibilidad para contener Li, así como otros elementos existentes en este tipo de depósitos, como K y B.

Los salares pre-andinos, Atacama, Pedernales y Maricunga, localizados en cuencas pre-andinas ubicadas al oriente de la precordillera de las regiones de Antofagasta y Atacama, y a unos 2.300 a 3.700 m s.n.m. son sistemas dinámicos, en los cuales la salmuera migra y varía en volumen, concentración y distribución en el cuerpo salino. Los salares andinos están localizados en el altiplano de las cuatro regiones del norte del país, entre 3.500 y más de 4.000 m s.n.m., en cuencas relacionadas principalmente con el volcanismo del lapso Mioceno-Pleistoceno, y son afectados por la pluviosidad del denominado invierno altiplánico. Estos dos tipos de salares constituyen ambientes naturales de gran complejidad y fragilidad, cuya protección, conservación y manejo debe ser prioritaria para el Estado de Chile debido a su relación con recursos minerales, recursos hídricos, áreas protegidas, humedales, sectores de interés científico, biodiversidad altiplánica y pueblos originarios.

En los salares pre-andinos Atacama, Pedernales y Maricunga el Estado de Chile y empresas privadas han efectuado estudios destinados a conocer su potencial de Li y otros recursos de interés, y a determinar sus recursos y reservas. Dichos estudios, efectuados a partir de inicios de la década del 60 del siglo 20 por el ex Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), condujeron tanto a la explotación del salar de Atacama, actualmente el único salar, en el país, en explotación por Li, desde 1984, y por K, desde 1994, y uno de los más importantes yacimientos de litio en el mundo, como a la determinación de recursos de litio en los salares Pedernales y Maricunga, tanto por la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO-Chile), como por empresas privadas.

Estudios de carácter público en salares fueron retomados en el año 2006 por Sernageomin, con la elaboración del estudio “Depósitos salinos de tipo salar en la I región de Tarapacá” (Gajardo y Carrasco, 2006), con el cual esta institución inició trabajos más detallados y con enfoques multidisciplinarios en estos depósitos salinos, situación que continúa en la actualidad.

Por tal motivo, entre los años 2010 y 2022 la programación de Sernageomin en este tema ha estado orientada a determinar el potencial como fuente de Li de los salares andinos, con base en los estudios de 15 salares efectuados en los años 2010 y 2013 (Troncoso et al., 2013), ubicados tanto en la región de Antofagasta (Tara, Aguas Calientes Norte, Pujsa, Loyoques o Quisquiro, Aguas Calientes Centro, El Laco, Aguas Calientes Sur, Aguas Calientes Sur Sur y Pajonales), como en la región de Atacama (Gorbea, Agua Amarga, La Isla, Las Parinas, Aguilar y Grande). Estos salares fueron seleccionados a partir de los casi 40 salares andinos existentes en el norte del país, con base en los siguientes factores: contenido de Li equivalente (mg/l), área del salar (km²); razón Li/K y razón Li/Mg, lo que permitió determinar para 7 de ellos dos niveles de potencial de Li, potencial medio: Loyoques o Quisquiro, Tara, Aguilar y Las Parinas; potencial alto: Aguas Calientes Centro, Pajonales y La Isla.

De estos 7 salares andinos, estudios de mayor detalle realizados entre los años 2019 y 2022 por esta institución han identificado 4 salares con recursos potenciales de Li: salar de Pajonales, en la región de Antofagasta (Carrasco y Cádiz, 2020) y salares de La Isla (Carrasco y Cádiz, 2019), Las Parinas (Carrasco y Cádiz, 2021) y Aguilar (Carrasco y Cádiz, 2022), todos en la región de Atacama, que en términos de recursos potenciales identificarían los de principal interés actual para una eventual exploración y explotación. De esa forma, restan por estudiar los salares Tara, Loyoques o Quisquiro y Aguas Calientes Centro, en la región de Antofagasta.

En consecuencia, la información resultante de los estudios efectuados por Sernageomin respecto del potencial como fuente de Li de estos 15 salares andinos, es única en el país a nivel de información de uso público.

Sin embargo, la real factibilidad de explotación de estos 4 salares, así como de todos aquellos salares andinos que presenten potenciales recursos de interés por Li y otros recursos, deberá estar definida por estudios que permitan determinar tanto los recursos y reservas de Li, y eventualmente de K y B, contenidos en ellos, como las reales ventajas comparativas para su exploración y explotación por recursos salinos, considerando, especialmente, factores geológicos, climáticos y ambientales, dadas las particulares características de estos salares y de la zona altiplánica donde ellos se distribuyen.

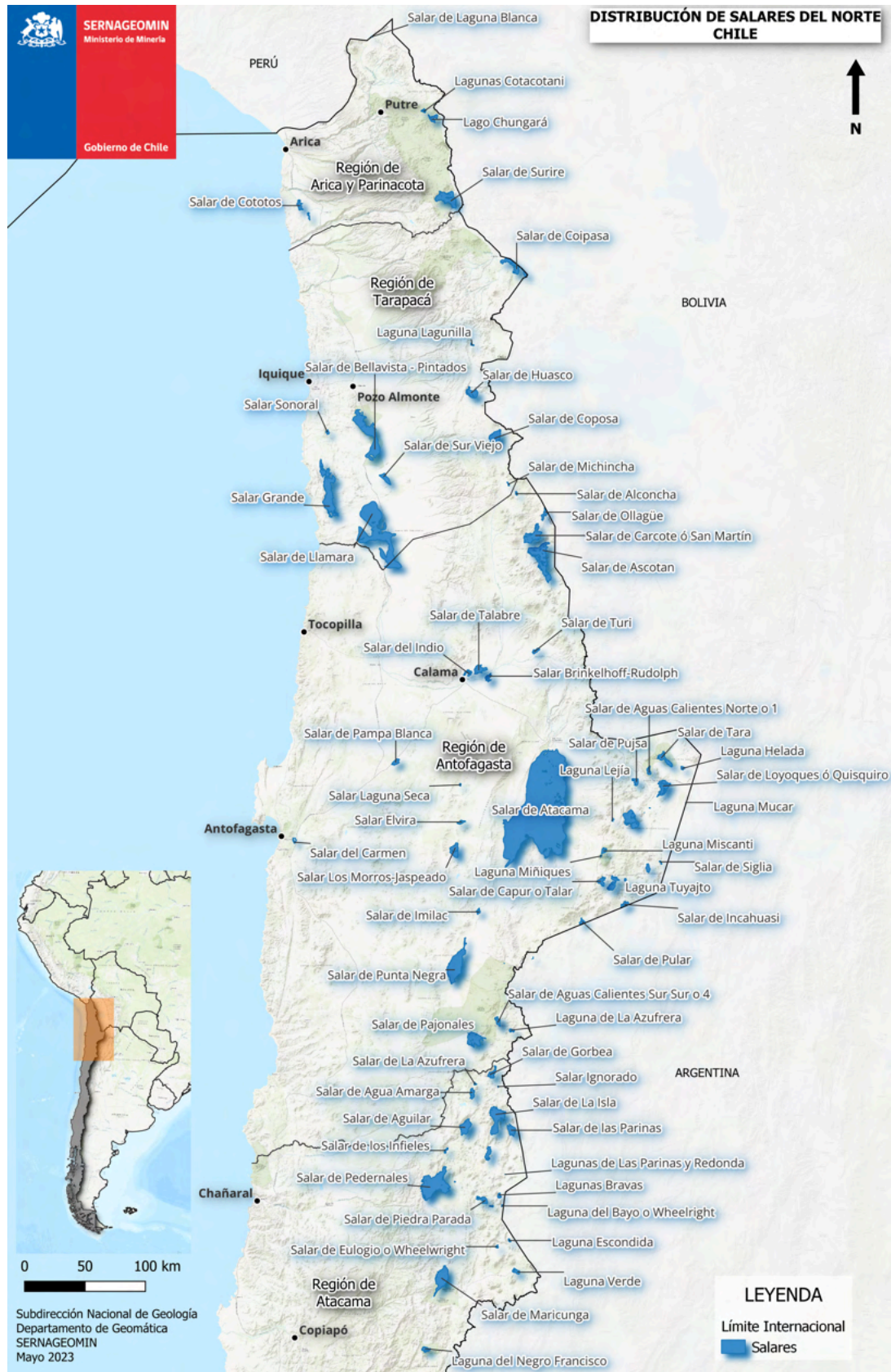


Figura 1: Salares y lagunas del norte de Chile.

Respecto de los factores ambientales, objetivo de este trabajo, y de acuerdo con el estudio realizado por Sernageomin y el ex Comité de Minería No Metálica (CMNM) de CORFO en 2017 (Sernageomin-CMNM, 2017), tendiente a establecer una priorización respecto del potencial de litio de los 15 salares andinos seleccionados y estudiados por Troncoso *et al*, (2013), existen diversos factores ambientales que pueden influir en las perspectivas de explotación de algunos de estos salares, y que se relacionan con:

- a) el uso del agua por parte de las comunidades originarias, sustentado tanto por la existencia de derechos legales que protegen y controlan el uso del recurso, por ejemplo, en los salares Aguas Calientes Centro, El Lago, Aguas Calientes Sur y Grande, como por los derechos ancestrales de las comunidades sobre este recurso natural.
- b) afectación de humedales (vegas y bofedales) que albergan y protegen la biodiversidad, por ejemplo. los salares de Aguas Calientes Norte, Tara, Las Parinas y Grande.
- c) afectación de áreas protegidas, como los salares Tara, Pujsa y Aguas Calientes Sur Sur, los que según el Convenio de RAMSAR (convenio internacional para la conservación de humedales) no deben ser considerados como fuentes de Li.
- d) salares de interés científico, por ejemplo. los salares de Aguilar, Agua Amarga y Gorbea, que contienen estructuras estromatolíticas (estructuras minerales originadas por actividad bacteriana, evidencia de vida más antigua conocida en la Tierra), razón por la cual constituyen áreas idóneas para incrementar el conocimiento geocientífico y ambiental.
- e) importante presencia de biodiversidad por ejemplo los salares de La Isla y Las Parinas, representada por poblaciones de 3 especies de flamencos: flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), parina grande (*Phoenicoparrus andinus*) y parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*) que los habitan de forma estacional o permanente.

De lo anterior se confirma que los salares andinos son ambientes naturales muy dinámicos, de gran complejidad y fragilidad, debido a lo cual toda actividad de exploración o explotación que se emprenda en ellos deberá realizarse con el más estricto respeto por el medambiente, por las comunidades aledañas y por la biodiversidad, de acuerdo tanto con la normativa vigente como con aquella que sea necesario desarrollar para dar cumplimiento a estos requerimientos.

Cabe señalar que recientemente, en abril de 2023, el presidente Gabriel Boric Font dio a conocer la Estrategia Nacional del Litio, la cual menciona que se creará una “Red de Salares Protegidos,” y, en aquellos salares que están siendo explotados actualmente, se deberá asegurar el uso de tecnologías de bajo impacto ambiental. Además, en ella se reconoce que los salares son ecosistemas complejos, únicos y altamente biodiversos, y que están sufriendo una importante degradación tanto a nivel global como en Chile. Lo anterior obliga a resguardar la sustentabilidad ecológica a largo plazo de estos ecosistemas. Por esto, la estrategia contempla la creación de la red de sistemas de salares protegidos, compuesta por, a lo menos, un 30% de la superficie de estos ecosistemas, en concordancia con las obligaciones internacionales comprometidas por el Estado de Chile en la Convención Marco de Biodiversidad (<https://www.cbd.int/convention/>).

En consecuencia, resulta imperativo que el Estado de Chile tenga el más amplio, y, a la vez, detallado y actualizado conocimiento acerca de estos salares pre-andinos y andinos, con el objeto de poder decidir adecuadamente cuáles y cuántos de ellos serán efectivamente susceptibles de ser seleccionados para iniciar actividades de exploración y explotación por Li y otros minerales, en un marco de desarrollo sustentable.

Palabras Clave: salares andinos, Li, impactos ambientales.

Referencias:

- Carrasco, R.; Cádiz, N., 2019. Potencial de litio en el salar de La Isla, Región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-74: 95 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N., 2020. Potencial de litio en el salar de Pajonales, región de Antofagasta, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-85: 95 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N., 2021. Potencial de litio en el salar de Las Parinas, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-94: 96 p. Santiago.
- Carrasco, R.; Cádiz, N., 2022. Potencial de litio en el salar de Aguilar, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-22-101: 100 p. Santiago.
- Gajardo, A.; Carrasco, R., 2006. Depósitos salinos de tipo salar en la I región de Tarapacá, Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-06-30: 56 p. Santiago.
- Servicio Nacional de Geología y Minería-Comité de Minería No Metálica (Sernageomin-CMNM), 2017. Priorización de salares del norte de Chile con relación a su potencial en litio: resultados del taller de trabajo Sernageomin-CMNM, 10 de enero 2017. Servicio Nacional de Geología y Minería-Comité de Minería No Metálica, Documento Interno (Inédito), SNGM-1000-QA-001/CMNM-REP-GC-002: 35 p. un anexo.
- Troncoso, R.; Ercilla, O.; Carrasco, R.; Vivallo, W., 2013. Estudio del Potencial de litio en Salares del Norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado, IR-13-55: 251 p.
- Vila, T., 1986. Geología de los depósitos salinos del norte de Chile: antecedentes geoquímicos y pautas de prospección de litio. In: Geología y recursos minerales de Chile (Frutos, J.; Oyarzún, R.; Pincheira, M. editores), Universidad de Concepción, Tomo 2: 799-819.

Evolución químico-mineralógica de AMD en climas semi áridos

Javiera Gerding¹, Juan Morales², Alexey Novoselov¹

(1) Instituto de Geología Económica Aplicada, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

(2) Departamento de Geología, Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Salamanca, Salamanca, España

Introducción

La oxidación de sulfuros, especialmente la pirita, es un problema ambiental conocido tanto en la minería activa como en depósitos inactivos. Dependiendo de la cantidad de agua disponible y la mineralogía inicial, este proceso de oxidación puede generar soluciones ácidas, conocidas como drenaje ácido de mina, o "AMD" por sus siglas en inglés [1]. Dold y Fontobé (2001) explican que, dependiendo del clima imperante, estas soluciones ácidas podrían descender o migrar por afluentes, cuando el clima es dominado por precipitación, o podrían precipitar como sulfatos en superficies cuando el clima es dominado por evaporación.

Este estudio se centra en la caracterización y comprensión de la evolución de sulfatos depositados sobre el relave Delirio (Punitaqui, Región de Coquimbo).

Metodología

Se recolectaron muestras de sulfatos a comienzos de la temporada seca (noviembre 2018) y luego al final de esta (marzo 2019). Además, se muestrearon los sustratos (relaves) de dichas sales. Estas muestras fueron embolsadas y trasladadas debidamente hasta el laboratorio del Instituto GEA de la Universidad de Concepción, donde se realizaron los ensayos.

Se realizaron análisis químico por fluorescencia de rayos X (FRX, Rigaku ZSX Primus II), mineralógico por difracción de rayos X (DRX, Bruker D4 Endeavor) y de microscopía electrónica de barrido (SEM, TESCAN VEGA II LSH).

Además, con los resultados de DRX de los sulfatos, se escogieron 2 muestras representativas para realizar una disolución y reprecipitación de sales. Estas fueron disueltas al 25% en agua destilada y dejadas evaporar por 10 días, con ciclos diurnos-nocturnos, a temperaturas entre 10 y 40°C y humedad relativa entre 40 y 90%. Las sales resultantes de este ensayo fueron estudiadas mediante DRX.

Resultados y Discusión

Las muestras de relave contienen principalmente cuarzo, pirita, jarosita y yeso, mientras que las sales eflorescentes están compuestas mayoritariamente por sulfatos del grupo de la copiapita, halotriquita, coquimbita y alunógeno. Estas asociaciones, tanto en el sustrato como en los sulfatos de superficie, indican condiciones ácidas del relave de estudio, con una historia evolutiva de precipitación-disolución [3, 4].

De la mineralogía en los sulfatos colectados en terreno, se puede observar una precipitación fraccionada. Los sulfatos de inicio de temporada son preferentemente una mezcla de Fe-copiapita, coquimbita, yeso y alunógeno; mientras que las muestras que fueron tomadas a finales de temporada presentan, además, Mg-copiapita y halotriquita.

Por otro lado, en el ensayo de disolución y recristalización se utilizó una muestra rica en copiapita que precipitó en 2 etapas. Una predominante, compuesta principalmente por Fe-copiapita, y otra posterior, de menor volumen, donde se evidenciaba la presencia de Mg-copiapita y abundante alunógeno. Por el contrario, en el caso de la disolución de las muestras ricas en halotriquita, no se observó este tipo de precipitación fraccionada.

Esta precipitación fraccionada evidenciada en terreno y a nivel de laboratorio en copiapita, podría interpretarse como una evolución de las soluciones salinas, donde la precipitación temprana de Fe-copiapita enriquece las aguas en Al y Mg, dando paso a una segunda precipitación con sulfatos ricos en estos elementos [5]. Ayora (2022) también mencionan una precipitación tardía de halotriquita sobre sulfatos previamente cristalizados.

En cuanto a la química de las muestras, se observa un aumento de Cu, Co, Mn y Ni hacia la superficie ligado a las sales eflorescentes, comparado con el sustrato, coincidente con estudios previos [5, 7, 8] que también reportan estos sulfatos, especialmente a copiapita y halotriquita, como contenedores de metales base. En este estudio, se tiene que la mayor concentración de metales (Cu, Co, Ni, Mn) está asociada a la presencia de halotriquita, seguido de Mg-copiapita y por último Fe-copiapita. Además, a través de microscopía electrónica es posible ver sulfatos ricos en Cu, Co y Mn sobre el ápice de hojas de Mg-copiapita, evidenciando que los metales se van acumulando en la solución residual, precipitando a finales de la temporada seca.

Conclusión

La evaporación en sistemas con drenaje ácido presente conlleva la precipitación de sulfatos que suelen ser contenedores de metales pesados. Esta precipitación de sulfatos se observa en etapas, siendo las primeras fases ricas en Fe, para luego precipitar fases ricas en Mg y Al. Los metales pesados tienden a acumularse hacia el final de la precipitación.

Palabras Clave: relaves, AMD, metales base, sulfatos.

Referencias:

- 1. Wang, H., P.A. Dowd, and C. Xu, 2019. A reaction rate model for pyrite oxidation considering the influence of water content and temperature. *Minerals Engineering*, 134: p. 345-355.
- 2. Dold, B. and L. Fontboté, 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration*, 74(1): p. 3-55.
- 3. Jambor, J.L., D.K. Nordstrom, and C.N. Alpers, 2000. Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40: p. 302-350.
- 4. Huminicki, D.M.C. and J.D. Rimstidt, 2009. Iron oxyhydroxide coating of pyrite for acid mine drainage control. *Applied Geochemistry*, 24(9): p. 1626-1634.
- 5. Romero, A., I. González, and E. Galán, 2006. The role of efflorescent sulfates in the storage of trace elements in stream waters polluted by acid mine-drainage: The case of Peña Del Hierro, southwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*, 44(6): p. 1431-1446.
- 6. Ayora, C., et al., 2022. Partition of Rare Earth Elements Between Sulfate Salts Formed by the Evaporation of Acid Mine Drainage. *Mine Water and the Environment*, 41(1): p. 42-57.
- 7. Carmona, D.M., Á. Faz Cano, and J.M. Arocena, 2009. Cadmium, copper, lead, and zinc in secondary sulfate minerals in soils of mined areas in Southeast Spain. *Geoderma*, 150(1): p. 150-157.
- 8. Basallote, M.D., et al., 2019. Mineralogically-induced metal partitioning during the evaporative precipitation of efflorescent sulfate salts from acid mine drainage. *Chemical Geology*, 530: p. 119339.

Génesis de Depósitos de Tierras Raras Hospedadas en Regolitos, Cordillera de la Costa, Chile Central

Carlos Marquardt¹, Juan Pablo Navarro², René Henríquez², Nicolás Bustos¹, Paulina Vergara¹, Tomás Roquer¹, Ignacio Pavez²,
Nadia Jara², Diego Monares², Diego Delgado², Patricio Iribarra²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Minería y Departamento de Estructuras y Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860 Macul, Santiago, Chile

(2) ACLARA, Geología, Hualpén, Concepción, Chile

Los depósitos de elementos de tierras raras hospedados en regolitos (DREE-HR) son latamente conocidos en Asia, especialmente en China, y están adquiriendo cada vez más importancia debido a la creciente demanda mundial de estos metales, lo cual ha llevado al descubrimiento durante esta última década de nuevos depósitos de este tipo en América y en otras partes del mundo. En este trabajo se aborda la génesis y características de algunos de los DREE-HR que han sido descubiertos en la Cordillera de la Costa de Chile Central y que están en vías de evaluación para su desarrollo sustentable. Para esto se realizaron mapeos geológicos y geomorfológicos y se analizaron muestras de roca fresca y regolitos arcillosos con REE iónicas en diferentes perfiles de suelo. Estos depósitos se formaron por procesos de meteorización física y química que afectan a las rocas, principalmente graníticas, las cuales forman regolitos residuales donde es posible identificar pedolitos y/o saprolitos. Las características geomorfológicas del terreno, junto con las condiciones climáticas y las litologías favorables, permiten un mayor desarrollo de regolitos y lixiviación supérgena para concentrar y preservar DREE-HR. Uno de los grandes desafíos de la exploración de estos tipos de yacimientos es comprender cuáles son las morfologías, protolitos, minerales y elementos guías para detectar la presencia de zonas con enriquecimiento de REE en regolitos. Los resultados indican la presencia de dos subtipos de DREE-HR, con una concentración intercambiable de REE >300 ppm y <2000 ppm. Los primeros corresponden a regolitos con perfil de suelo completo y preservado, los cuales presentan una mineralización ligeramente dominante en elementos de tierras raras pesadas (HREE: Gd – Lu). Los regolitos parcialmente erosionados, en cambio (segundo tipo), muestran una mineralización ligeramente dominante en elementos de tierras raras livianas (LREE: La – Eu). Se observa una relación entre los procesos de pedogénesis y la mineralización de REE, incluyendo anomalías de itrio (Y), neodimio (Nd), praseodimio (Pr), torio (Th) y cerio (Ce). El análisis mineralógico de las rocas frescas indica, por ejemplo, la presencia de allanita y monacita como minerales que contienen tierras raras en las rocas huésped. El estudio define un modelo de mineralización donde el avance del horizonte de pedolito/saprolito, durante la meteorización progresiva y la descomposición de minerales primarios con REE, fue responsable de la neoformación de arcillas con capacidad de adsorber REE en su superficie mineralógica. Por otro lado, se desprende que la evolución del paisaje controló la preservación de la mineralización en los perfiles de regolito, y que una buena comprensión de la interacción entre los controles del desarrollo del regolito y la preservación del regolito durante la evolución del paisaje son herramientas importantes para la exploración de tierras raras en la región.

Palabras Clave: Tierras Raras, Depósitos Ion-Adsorción, Depósitos Hospedados en Regolito, Procesos supérgenos

Mineralogy and geochemistry of iron oxide-rich zones at the Punta del Cobre district

Francisco Morales¹, Karl Riveros Jensen¹, Víctor Fritis², Miguel Narvaez²

(1) Universidad de Atacama, Geología, Ingeniería, Copayapu 485, Copiapó, Chile

(2) Sociedad Punta del Cobre S.A., Área de Geología, Rancagua 200, Copiapó, Chile

Introduction

Iron oxide-copper-gold (IOCG) and iron oxide-apatite (IOA) cretaceous deposits of northern Chile host large volumes of magnetite, representing the most important iron ore in these systems (e.g., Sillitoe, 2003). Several authors have documented the occurrence of trace elements within the structure of magnetite (e.g., Huang et al., 2019; Huang and Beaudoin, 2019; Salazar et al., 2020), which has allowed to define how magnetite forming conditions evolved through time and space (Palma et al., 2020; Rodríguez-Mustafa et al., 2020).

Geological background

The Punta del Cobre district is mainly hosted by volcanic and sedimentary rocks related to the Punta del Cobre Formation and Chañarillo Group respectively. The lowest parts of Punta del Cobre Formation (Geraldo Negro Member; locally named "Lower Andesites") consist of fine to medium grained porphyritic andesites, where phenocrysts consist of plagioclase, hornblende and minor pyroxene. Albitized porphyritic dacites ("Albitófiro") overlie the Lower Andesites. The upper volcanoclastic succession (Algarrobo Member) consists of red polymictic sedimentary breccias, siltstones and chert. The upper part of the member consists of volcanic breccias and basaltic andesites interbedded with carbonatic rocks (Upper Andesites). The main intrusive body corresponds to La Brea stock (118 ± 1 Ma; Marschik and Söllner, 2006), that consists of a coarse-grained diorite with clinopyroxene and hornblende.

Methodology

Eight representative drill holes were selected from the most intensely mineralised zones in the three deposits. All iron oxide-rich zones were geochemically analyzed by pXRF, obtaining Co, Ni, Ti, V and Fe concentrations. In order to define the alteration and mineralization assemblages, 40 polished and thin sections were subjected to petrographic and metallographic studies by transmitted and reflected light microscopy respectively. In order to corroborate the mineralogical controls and the spatial distribution of trace elements within crystals, high-resolution mineralogical analyses were done in a subset of 20 polished sections samples by SEM - EDS.

Approximately 20cm samples were selected from the most magnetite-rich zones (>40% magnetite). These samples were cut and scanned pointwise with pXRF. Finally, the samples that reported the highest values of the desired elements were subjected to SEM-EDS.

Results

In Punta del Cobre and Mantos de Cobre deposits, iron oxides are mainly hosted by the Geraldo Negro Member. In the deepest zones of these deposits, iron oxides are mostly represented by magnetite, which occurs as veins, stockwork, massive and as matrix of breccias, and these ore bodies are controlled by NNW structures. However, in the shallowest zones, iron oxides are represented by magnetite, musketovite and hematite, where mineralised bodies display an important lithological control and mainly occur disseminated, forming manto-type mineralized zones. In the granate deposit, magnetite is the most important iron oxide, which is hosted by the upper and lower zones of the Geraldo Negro and Algarrobo members respectively. In the deepest zones of Granate, magnetite occurs as matrix of hydrothermal breccias and as banded bodies, whereas in the shallowest zones is mainly related to veins and dissemination.

Magnetites from the deep zones of Punta del Cobre, Mantos de Cobre, and Granate deposits are relatively enriched in Co, Ni and V, showing median values of 4080, 360 and 715 ppm respectively, whereas in the shallow zones, magnetites host lower concentrations for these elements, displaying median values of 1060, 210 and 120 ppm respectively. A good positive correlation between Co and Fe is observed in the three deposits, where the highest Co concentrations (>0.5%) are related to Fe values higher than 50%, suggesting that Co is hosted by magnetite.

High-resolution analyzes by SEM-EDS support the occurrence of these elements in the magnetite structure. Within crystals, Co, Ni and V are homogeneously distributed, not showing zonation structures. However, it is not possible to rule out that the absence of zonation could be associated with an insufficient resolution of the EDS system.

Conclusions

Geochemical results indicate that Co, Ni and V are ~4, ~2 and ~6 times more concentrated in the deepest magnetites relative to the shallowest one. This implies that mineralizing fluids associated with magnetite precipitation, experienced a spatial and/or temporal geochemical evolution in the Punta del Cobre district. This is consistent with metallogenic models defined in other IOCG systems (e.g., Barra et al., 2017; Rodríguez-Mustafa et al., 2020). However, a higher analytical resolution is necessary to accurately quantify the concentration of trace elements (e.g., LA-ICP-MS).

Keywords: magnetite, geochemistry, IOCG, Punta del Cobre.

Financing: This contribution was funded by project FIC-FNDR 2018 ID BIP 40013595 "Núcleo de investigación del Cobalto y Tierras Raras". We thank PUCOBRE SA. for providing technical and logistical support during field work and sampling activities.

References:

- Huang, X. W., & Beaudoin, G. (2019). Textures and chemical compositions of magnetite from iron oxide copper-gold (IOCG) and Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposits and their implications for ore genesis and magnetite classification schemes. *Economic Geology*, 114(5), 953-979.
- Huang, X. W., Boutroy, É., Makvandi, S., Beaudoin, G., Corriveau, L., & De Toni, A. F. (2019). Trace element composition of iron oxides from IOCG and IOA deposits: relationship to hydrothermal alteration and deposit subtypes. *Mineralium Deposita*, 54, 525-552.
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A. C., & Romero, R. (2020). A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 126, 103748.
- Rodríguez-Mustafa, M. A., Simon, A. C., del Real, I., Thompson, J. F., Bilenker, L. D., Barra, F. & Cadwell, D. (2020). A continuum from iron oxide copper-gold to iron oxide-apatite deposits: Evidence from Fe and O stable isotopes and trace element chemistry of magnetite. *Economic Geology*, 115(7), pp. 1443-1459.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., Romero, R. & Rojo, M. (2020). Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 55, 409-428.
- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), pp. 787-812.

The geology and mineralisation of the Cortadera copper-gold-molybdenum porphyry deposit in the Cretaceous magmatic belt of northern Chile

David Olivares Cid¹, Sebastian Costa¹, Miguel Tapia¹, Cristian Vásquez¹, Andrea Aravena¹, Madeline Wallace², Steve Garwin²⁻³⁻⁴, Christian Easterday², John Beeson², Kirsty Sheerin², Chris McKie²

(1) Hot Chili Ltd., Tenth Floor, 1001 office, Isidora Goyenechea 2934, Las Condes, 75550, Santiago, Chile

(2) Hot Chili Ltd., First Floor, 768 Canning Highway, Applecross, Western Australia 6153, Australia

(3) Steven L Garwin Pty Ltd., 7 Bruce Street, Nedlands, Western Australia 6009, Australia

(4) University of Western Australia, Centre for Exploration Targeting, School of Earth Sciences, 35 Stirling Highway, Crawley, Western Australia 6009, Australia

The Cortadera copper-gold-molybdenum porphyry deposit is located 35 km south of the township of Vallenar within the Jurassic-Cretaceous metallogenic belt of the Coastal Cordillera of the Atacama region. The deposit is owned by Hot Chili Limited (HCH) through its 100% subsidiary company Sociedad Minera La Frontera SpA. The Cortadera deposit is the centerpiece of the Company's low-altitude Costa Fuego copper-gold project, which also includes the Productora and San Antonio deposits.

The Jurassic-Cretaceous belt has typically been characterized by strata-bound copper, vein-type iron oxide-copper-gold (IOCG), iron oxide-apatite (IOA) and porphyry copper deposits (e.g. Richards et al., 2017). Within this belt, host-rocks consist of the andesitic Punta del Cobre Formation, and the contemporaneous Chañarcillo Group. The Chañarcillo Group can be subdivided into the Nantoco, Totoralillo and Pabellón formations, which are characterized by limestones with minor amounts of shales and calcareous sandstones, and volcanic rocks (Creixell et al., 2020). The Cortadera deposit is spatially and genetically related to three tonalitic intrusive centers of late Cretaceous age (93 - 91 Ma; Armstrong, 2020), which occur at the intersection between the NW-SE oriented Serrano Fault and N-S to NNE trending fault and dyke corridors. Directly to the west of Cortadera, the east-dipping Las Cañas-El Torito Fault extends ~50 km along a northerly strike-direction. Post-mineralisation, reverse- and oblique-movement along this fault is interpreted between 89 and 84 Ma (Creixell et al., 2020).

Through the application of the Anaconda method to geological mapping and drill-core logging in the Cortadera deposit, four major stages of intrusion have been identified: early-, intra- and late-mineralisation porphyritic tonalite to quartz diorite intrusions as well as the post-mineralisation andesitic dykes (Garwin et al., 2022). The adjacent volcano-sedimentary units have been locally recrystallised to hornfels and skarn (Haren and von Wielligh, 2022). Early-stage tonalite intrusions typically contain more than five volume-percent quartz veins, as determined by visual logging; whereas intra-mineralisation tonalite intrusions commonly contain one to five volume-percent quartz veins (Tobey, 2012; Haren and von Wielligh, 2022). These two stages of intrusion are characterized by a pervasive hydrothermal sericite- and sericite-chlorite-albite alteration, chalcopyrite-pyrite (occasionally magnetite) mineralisation and contain significant Cu-Au-Mo. The mean (average) values for the early- and intra-mineralisation intrusions are 0.44 and 0.24 wt.% Cu, 0.15 and 0.10 g/t Au, and 84 and 53 ppm Mo, respectively. Late-stage tonalite dykes clearly post-date the early- and intra-mineralisation intrusions and are characterized by less than one volume-percent quartz veins and mean values of < 0.1 wt.% Cu, 0.03 g/t Au and 19 ppm Mo. Post-mineralisation andesite dykes crosscut the early-, intra- and late-mineralisation tonalitic intrusions, lack porphyry-style quartz veins and have very low Cu, Au and Mo grades (Garwin et al., 2022). The vein paragenesis is characterized by early quartz-rich UST-veins, quartz-rich A-veins (chalcopyrite-pyrite±magnetite), banded MAB veins (quartz-magnetite-chalcopyrite-pyrite) and B-type quartz veins (chalcopyrite-pyrite-molybdenite), that are cut by sericite-chlorite-bearing C-veins (pyrite-chalcopyrite) and pyritic D-veins with feldspar-destructive haloes of quartz-sericite alteration. There is a clear correlation between increased percentage of quartz-bearing A- and B-type stockwork veining and chalcopyrite-(pyrite) content with elevated copper-gold grades.

Successful resource expansion and target generation at Cortadera has been achieved through the comprehensive understanding of the main controls of the ore forming processes and the associated distributions, this by the development of a 4D geological model. On March 31st, 2022, an updated mineral resource estimate (MRE) was reported (in compliance with NI 43-101) to contain 471 Mt at 0.46% CuEq* of indicated material, and an inferred resource of 108 Mt grading 0.35% CuEq*, for a total contained metal of 1.98 million tonnes of copper and 2.1 million ounces of gold. The combined resource of the Costa Fuego project comprises a total of 725 Mt at 0.47% CuEq* of indicated material, and 202 Mt at 0.36% CuEq* of inferred material for a combined metal content of 3.4 million tonnes of copper and 2.9 million ounces of gold.

Keywords: Cortadera, porphyry, Northern Chile.

References:

- Armstrong, R., 2020. SHRIMP U-Pb geochronology of samples from the Cortadera project, Chile, unpublished report for Hot Chili Ltd., PRISE – Research School of Earth Sciences, Australia National University, 8 May 2020, 20 p.
- Creixell, C.; Fuentes, J.; Bierma, H.; Salazar, E. 2020. Tectonic setting of Cretaceous porphyry copper deposits of northern Chile (28°-30° S) and its relations with magmatic evolution and metallogeny. *Andean Geology* 47 (3): 469-507.
- Garwin, S., Whistler, B., Ward, J. et al, 2022. The Application of Geologic Mapping, Core Logging, and 3-D Geoscientific Data Integration in the Exploration and Resource Expansion of Porphyry Copper-(Gold) Deposits: Examples from Recent Discoveries in Ecuador and Chile. *SEG Discovery*, 131, 13-24.
- Haren, E., and von Wielligh, A., 2022. Resource report for the Costa Fuego copper project located in Atacama, Chile, Technical Report NI 43-101, prepared by Haren Consulting and ABGM for Hot Chili Ltd., 13 May, 2022, 610 p.
- Richards, J.; López, G.; Zhu, J.-J.; Creaser, R.; Locock, A.; Mumin, H. 2017. Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with Cretaceous porphyry Cu±Mo±Au and Intrusion-related Iron Oxide Cu-Au deposits in northern Chile. *Economic Geology* 112: 295-318.
- Tobey, E., 2012. Johanna project exploration activity report, Vallenar area, Chile, unpublished report for Minero Fuego, February – March, 2012, 18 p.

Concentración y distribución de cobalto en piritas, caso de estudio de un depósito mineral tipo IOCG en Chile

Javier Quevedo Mackay¹⁻², Romke Kuyvenhoven³⁻⁴

(1) Centro de Estudios de Minerales Estratégicos y Críticos de Chile (CEMEC), Chile

(2) Amphos 21, Santiago, Chile

(3) MDE Minerals Consulting, Santiago, Chile

(4) Metcelerate

Algunos elementos químicos como el vanadio (V), galio (Ga), platino (Pt), elementos de tierras raras (REE), cobalto (Co), entre otros, son llamados como "metales críticos" y forman parte de un grupo de commodities vitales para sustentar la vida moderna, pero que su suministro es interrumpido por diferentes factores. Se ha estimado que para el año 2050, elementos químicos como el cobalto tendrán una demanda que asciende a un 460% (Kirsten et al., 2020) debido a su uso en baterías de ión-litio y la transición a Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Según diversos estudios recientes, sulfuros como la calcopirita, marcasita, arsenopirita y pirita contienen interesantes concentraciones de diversos elementos químicos. En la pirita, es posible encontrar el cobalto debido a un proceso de solución sólida, a través de sustitución química del hierro, dentro de la estructura cristalina de esta (Reich et al., 2005; Huston et al., 1995; Townley et al., 2017).

El caso de estudio corresponde al depósito mineral tipo IOCG (Iron Oxide Copper Gold) La Estrella, el cual se encuentra localizado en la Franja Metalogénica Ferrífera chilena, específicamente en la Cordillera de la Costa en la Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962), a 20 km aproximadamente al suroeste de Vallenar, en la Región de Atacama, Chile. Estudios anteriores han indicado que en La Estrella se presentan, en roca total y mediante análisis ICP-MS, concentraciones sobre 1% Cu, de Fe presente en magnetita de hasta 60%, hasta 0,2% de Ni y V, y sobre 0,15% de Co. Cabe destacar, que las muestras que presentaron sobre 0,1% de Co están asociadas a concentraciones de Cu que alcanzan valores de hasta 0,8% (Kuyvenhoven, 2019). El objetivo de este trabajo es determinar cuáles son los eventos de mineralización y alteración hidrotermal con formación de pirita a los cuales se asocian las mayores concentraciones de cobalto, y cómo este elemento químico está distribuido dentro de los diferentes tipos de pirita del depósito mineral IOCG La Estrella. Para el desarrollo de este trabajo, la metodología consta de: 1) Identificación de la secuencia paragenética mediante trabajo en terreno y análisis de cortes transparentes y secciones pulidas; 2) Determinación la concentración y distribución de cobalto en piritas representativas de cada evento de mineralización y alteración hidrotermal en base a análisis químico ICP-MS-LA.

Como resultado, se identifican siete eventos de mineralización y alteración hidrotermal, en donde se diferencian 5 diferentes tipos de pirita: piritas en magnetita masiva, piritas en alteración sódica-cálcica, piritas en bolsones, piritas en alteración potásica biotítica, y piritas en vetillas de cuarzo euhedral. Al caracterizar la concentración y distribución de cobalto en estos diferentes tipos de pirita, se observa que las altas concentraciones de Co (promedio de 5614 Co ppm o 0,6% Co) están asociadas a los eventos de mineralización tempranos, principalmente en asociación mineralógica con magnetita y calcopirita. Por otra parte, las más bajas concentraciones de cobalto encontradas en este depósito mineral están en las piritas de eventos de alteración tardíos, asociados principalmente a cuarzo euhedral en vetillas (promedio de 391 Co ppm o 0,039% Co). Por otra parte, la distribución de cobalto dentro de la pirita según los análisis efectuados mediante ICP-MS-LA, muestra una interesante variación entre los diferentes eventos de cristalización de pirita. La pirita del primer evento de alteración y mineralización, asociada a magnetita masiva y calcopirita, tiene una tendencia a presentar las altas concentraciones de cobalto (mayor a 1000 ppm) en el núcleo del cristal y esta decrece hacia los bordes. Sin embargo, las piritas tardías en vetillas de cuarzo euhedral presentan el Co en los bordes y fracturas del cristal, evidenciando un proceso de adsorción más que de sustitución química con el Fe.

Se concluye que los primeros eventos de mineralización de pirita, asociados a magnetita, calcopirita, albita y biotita, en el depósito La Estrella, son responsables de las concentraciones más altas de cobalto (>1000 ppm) dentro de los cristales de pirita, el cual además está distribuido en el centro de los cristales. Por el contrario, el evento tardío con formación de pirita en La Estrella, caracterizado por piritas euhedrales en vetillas epitermales de cuarzo, tiene las concentraciones más bajas de cobalto y distribuido principalmente en los bordes. Estos resultados permiten identificar cuales son los eventos que traen concentraciones de cobre asociadas a interesantes concentraciones de cobalto, además de que conocer su distribución en el cristal puede optimizar el proceso extractivo desde una concentración de sulfuros en los depósitos tipo IOCG.

Palabras Clave: Cobalto, Minerales estratégicos, IOCG, Metales críticos, Pirita.

Financiamiento: SMI-ICE-Chile Universidad Mayor.

Agradecimientos: El autor expresa su agradecimiento al propietario del depósito mineral La Estrella, Don Luis Fritis, también al Sustainable Minerals Institute (SMI) y a CORFO.

Referencias:

- Huston, D., Sie, S., Suter, G., Cooke, D., Both, R., 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: part I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and part II Selenium levels in pyrite: comparison with delta 34 S values and implications for the source of Sulphur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, Vol. 90, p. 1167-1196.
- Kirsten H., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T., Drexhage, J., 2020. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition. The World Bank Group, Climate-Smart Mining Facility.
- Kuyvenhoven, R., 2019. Caracterización química-mineralógica y definición de rendimiento metalúrgico de mezclas de mineral de La Estrella. Informe final interno SMI-ICE Chile. p. 2- 23.
- Reich, M., Kesler, S., Utsunomiya, S., Palenik, C., Chrysosoulis, S., Ewing, R., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69. p. 2781-2796.
- Segerstrom, K., y Ruiz, C., 1962. Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. 3, No. 1, p. 115, 1 mapa escala 1: 50.000.
- Townley, B., Díaz A., Luca, R., 2017. Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile. CORFO, Comité Minería No Metálica y Sernageomin., AMTC, Universidad de Chile. p. 55.

A review of the mineral chemistry of pyrite and magnetite: A potential source for critical elements by-products in Chile

Olivia Mejías¹⁻⁴, Javier Quevedo Mackay²⁻⁴, Brian Townley³⁻⁴

(1) The University of Queensland, Sustainable Minerals Institute, Brisbane, Australia

(2) Amphos 21, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

(4) Centro de Estudios de Minerales Estratégicos y Críticos de Chile (CEMEC), Santiago, Chile

Introduction

Critical elements are indispensable commodities that play a vital role in global society, particularly in facilitating the transition to a low-carbon economy. Their importance is distinct in clean technologies such as solar panels, wind turbines, and electric vehicles. Determining the criticality of these elements involves assessing their economic significance and supply risks, due to this, criteria and context vary substantially by country. The supply of critical elements is increasingly restricted due to various factors, including their recovery as by-products, geopolitical challenges, and limited primary source discoveries (Jowitt et al., 2018). Thus, the limitation has led several mining nations to compile their own lists of critical materials. For example, Europe has identified 34 critical raw materials (European Commission, 2023), the United States has listed 23 (U.S. Geological Survey, 2023), Australia recognises 26 (Australian Government, 2022), Canada reports 31 (Government of Canada, 2021), China has designated 24 (Andersson, 2020), and Japan identifies 34 (Dewit, 2021).

Nevertheless, the distribution, occurrence, and concentration of critical elements, including cobalt (Co), vanadium (V), gallium (Ga), rare earth elements (REE), tellurium (Te), lithium (Li), indium (In), germanium (Ge), among others, within primary mineralization systems, as well as secondary deposits, remains an area of ongoing research and exploration. Addressing this knowledge gap requires an effort to investigate the geochemical, mineralogical, and cyclical/mobility aspects of these elements. This involves comprehensive characterization, ranging from macro to micro scales, as an initial step toward evaluating their economic potential for recovery.

As a result, there is a growing body of research in Chile focusing on several critical elements, in both primary and secondary deposits as potential future resources (e.g., Townley et al., 2017; Crespo et al., 2018; Araya et al., 2020; Villa-Gomez et al., 2022; González-Díaz et al., 2022).

This study provides a review of cobalt, tellurium, vanadium and gallium. These elements have garnered significant attention as they are included in various critical elements lists worldwide. Their primary uses revolve around low-emission energy production (e.g., Ga and Te), low-emission energy storage and usage (e.g., Co), and enhancing industrial production efficiency and infrastructure development (e.g., V and Co). The main aim of this study is to assess the content of Co, Te, V and Ga within various ore deposits in Chile. The review is focused on the mineral chemistry of pyrite and magnetite, which act as host minerals for these elements. Enhancing our understanding of the mineral chemistry of the hosted phases through a global comparison of various ore deposits could potentially increase interest in prioritizing and evaluating critical elements as valuable by-product resources in Chile.

Methodology

The study focuses on two main aspects: i) available published data collation of pyrite and magnetite chemistry of Co, Te, V and Ga assessed by microanalytical techniques such as Laser Ablation Inductive Coupling Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS), Electronic Probe microanalysis (EPMA), Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS), and/or Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS). ii) a database analysis comparing the concentrations of these critical elements against reported crustal abundance and evaluating the trends by different ore deposits.

A comprehensive dataset consisting of 1,278 analyses was compiled from 26 mine sites, encompassing pyrite and magnetite samples from diverse ore deposits in Chile. These deposits include Iron Oxide Copper-Gold (IOCG), Iron Oxide-Apatite (IOA), porphyry copper, epithermal, and stratabound deposits. The dataset was further categorized into 110 pyrite analyses and 1,168 magnetite analyses. The data collected correspond to specific analyses at the micron scale, representing specific concentrations and not an average global concentration for each mineral phase.

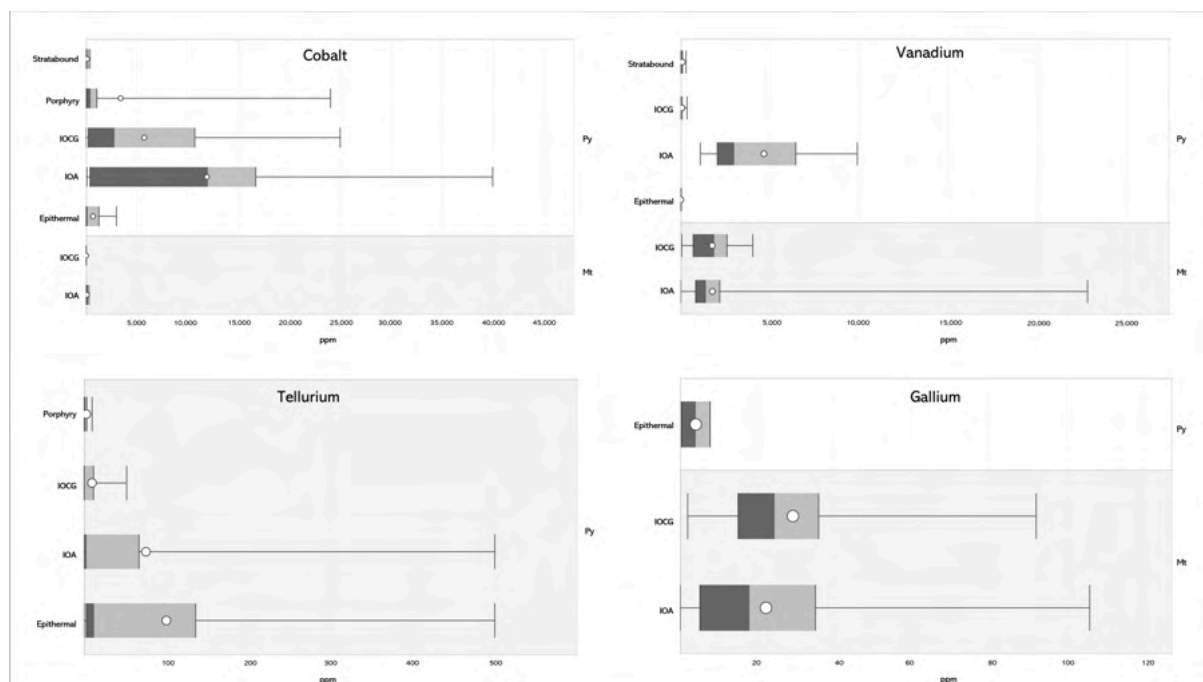
Results

The mineral chemistry of pyrite includes elements such as Co, Te and V, and there is limited data available for Ga. The mineral chemistry of magnetite comprises V, with fewer microanalysis data on Co and Ga, and as anticipated, information regarding Te is lacking.

Overall, pyrite present in IOA deposits exhibit the highest average Co concentration which is approximately 500 times higher than the crustal abundance. Following this, Co-bearing pyrite from IOCG deposits display a concentration level around 200 times higher, while Co-bearing pyrite from porphyry copper deposits exhibit an average concentration approximately 100 times higher. Additionally, epithermal and stratabound deposits demonstrate Co concentration levels that are 10 and 5 times higher respectively compared to the crustal abundance. In terms of Te concentrations, pyrite from epithermal and IOA deposits exhibit the highest levels, surpassing the crustal abundance by over 80,000 times. Te-rich pyrite present in IOCG deposits show Te concentrations around 9,000 times higher, while porphyry copper deposits exhibit Te concentrations approximately 2,500 times higher.

Notably, pyrite from IOA deposits are uniquely enriched in V compared to other deposit types, with concentrations that are 35 times higher than crustal abundance. Conversely, pyrite from stratabound, IOCG, and epithermal deposits host V-poor pyrite. Additionally, the presence of Ga in pyrite is exclusively reported in epithermal deposits, with concentrations below the crustal abundance.

On the other hand, the microanalytical data for magnetite is solely reported for IOA and IOCG deposits. The highest concentrations of Co are found in magnetite from IOA deposits, surpassing the crustal abundance by a factor of 5. Conversely, V concentrations in magnetite are 10 times higher in both IOA and IOCG deposits. Whilst the presence of Ga in magnetite is approximately 2 times higher in both IOCG and IOA deposits.



Concentrations of cobalt, vanadium, tellurium and gallium in pyrite and magnetite by ore Chilean deposits. Abbreviations: Iron Oxide Copper-Gold (IOCG); Iron Oxide-Apatite (IOA), Pyrite (Py), Magnetite (Mt).

Analytical data reveals thousands of ppm of Co in pyrite present in IOA deposits. For example, Co-bearing pyrite from the Los Colorados deposit (Reich et al., 2016) can contain up to 40,000 ppm Co. Similarly, IOCG deposits such as the Santos deposit (del Real et al., 2020) host pyrite with Co concentrations reaching up to 25,000 ppm. Porphyry copper deposits, exemplified by the Los Sulfatos deposit (Velásquez et al., 2020), reported Co concentrations up to 24,050 ppm. In terms of Te concentrations, Te-bearing pyrite from IOA deposits, including the Los Colorados deposit (Reich et al., 2016), can contain up to 800 ppm Te. Epithermal deposits such as Cerro Pabellón (Roman et al., 2019) show Te concentrations of up to 600 ppm in pyrite. V-rich pyrite has been reported in the Los Colorados deposit (Lagas, 2016) with concentrations of up to 9,900 ppm V.

In contrast, V-rich magnetite was found to contain up to 22,800 ppm V in the Mariela IOA deposit (Palma, 2020), while magnetite present in the La Estrella IOCG deposit (Quevedo, 2020) exhibited up to 4,021 ppm V. Co-bearing magnetite displays a maximum concentration of 303 ppm in the El Laco IOA deposit (Ovalle et al., 2022), whereas magnetite from the La Estrella IOCG deposit (Quevedo, 2020) contains up to 39 ppm Co. The highest reported value for Ga is observed in the El Laco IOA deposit (Ovalle et al., 2022), reaching up to 106 ppm Ga, followed by the La Estrella IOCG deposit with 92 ppm Ga (Quevedo, 2020).

Conclusions

Based on the enrichment factor exceeding 100 times the crustal abundance, it can be concluded that pyrite present in IOA deposits is significantly enriched in Co, followed by IOCG, and porphyry copper deposits. Te-rich pyrite is significantly present in IOA and epithermal deposits, followed by IOCG and porphyry copper deposits. On the other hand, when considering magnetite, the highest concentrations observed for V occur in both IOA and IOCG deposits, exceeding 10 times the crustal abundance. The average Ga concentrations in both magnetite and pyrite across all evaluated ore deposits were found to be in close proximity to the crustal abundance.

To sum up, the Chilean Iron Belt (IOA and IOCG deposits) exhibit notable concentrations for critical elements, including Co and Te in pyrite, as well as V enrichment in magnetite. Additionally, pyrite present in epithermal deposits show a high concentration of Te, and pyrite in porphyry copper deposits exhibit a moderate concentration of Co and Te.

Understanding the mineral chemistry of critical element-bearing minerals is an essential step towards formulating effective mineral processing workflows. However, it is imperative to emphasize that bulk analyses are indispensable for assessing the economic viability of metal concentrations within the targeted minerals.

Ensuring future supplies of critical elements includes comprehending their distribution within mineralizing systems and secondary deposits across different scales of characterization but also effectively applying this knowledge during resource and reserve assessments and mining operations. This potential encompasses the ability to recover critical elements as valuable by-products, rather than deporting them to waste.

Keywords: Critical elements, Mineral chemistry, By-products, Pyrite, Magnetite.

References

- Andersson, P. (2020). Chinese assessments of "critical" and "strategic" raw materials: Concepts, categories, policies, and implications. *The Extractive Industries and Society*, 7(1), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.008>.
- Araya, N., Kraslawski, A., and Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263(January 2019), 121555-121555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- Australian Government. (2022). *Critical Minerals Strategy* In: Department of Industry S, Energy and Resources (ed). pp 32.
- Crespo, J.; Reich, M.; Barra, F.; Verdugo, J.J.; Martínez, C. (2018). Critical Metal Particles in Copper Sulfides from the Supergiant Río Blanco Porphyry Cu-Mo Deposit, Chile. *Minerals* 2018, 8, 519. <https://doi.org/10.3390/min8110519>.
- del Real, I., Thompson, J. F. H., Simon, A. C., and Reich, M. (2020). Geochemical and Isotopic Signature of Pyrite as a Proxy for Fluid Source and Evolution in the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper-Gold District, Chile. *Economic Geology*, 115(7), 1493-1518. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4765>.
- Dewit, A. (2021). Decarbonization and Critical Raw Materials: Some Issues for Japan. *The Asia-Pacific Journal*, 19(3), 1-13.
- European Commission. (2023). *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report*.
- González-Díaz, E., García, S., Soto, F., Navarro, F., Townley, B., and Caraballo, M. A. (2022). Geochemical, mineralogical and geostatistical modelling of an IOCG tailings deposit (El Buitre, Chile): Implications for environmental safety and economic potential. *Journal of Geochemical Exploration*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2022.106997>.
- Government of Canada. (2021). *Canada's Critical Minerals List 2021*.
- Jowitt, S. M., Mudd, G. M., Werner, T. T., Weng, Z., Barkoff, D. W., and McCaffrey, D. (2018). The Critical Metals: An Overview and Opportunities and Concerns for the Future. *Metals, Minerals, and Society* (21), 25-38. <https://doi.org/10.5382/sp.21.02>.
- Lagas, G. (2016). Estudio de la química mineral de la pirita del yacimiento magnetita - apatito de Los Colorados, III Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, 127 p.
- Quevedo, J. (2020). Concentración y distribución de cobalto en piritas del depósito mineral IOCG La Estrella, Región de Atacama, Chile. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Universidad Mayor, Santiago, Chile, 121 p.
- Reich, M., Simon, A. C., Deditius, A., Barra, F., Chrysosoulis, S., Lagas, G., Tardani, D., Knipping, J., Bilenker, L., Sánchez-Alfaro, P., Roberts, M. P., and Munizaga, R. (2016). Trace element signature of pyrite from the Los Colorados Iron Oxide-Apatite (IOA) deposit, Chile: A missing link between Andean IOA and Iron Oxide Copper-Gold systems? *Economic Geology*, 111(3), 743-761. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.743>.
- Román, N., Reich, M., Leisen, M., Morata, D., Barra, F., and Deditius, A. P. (2019). Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246, 60-85. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.034>.
- Townley, B., Díaz, A., and Luca, R. (2017). Estado del Arte y Potenciales Recursos Co y Mn en Chile. Informe Técnico CORFO, Chile. 120 pp.
- U.S. Department of Energy. (2023). *Critical Materials Assessment*.
- Velásquez, G., Estay, H., Vela, I., Salvi, S., and Pablo, M. (2020). Metal-Selective Processing from the Los Sulfatos Porphyry-Type Deposit in Chile: Co, Au, and Re Recovery Workflows Based on Advanced Geochemical Characterization. *Minerals*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/min10060531>.
- Villa Gómez, D., Sáez Salgado, E., Mejías, O., Pat-Espadas, A. M., Pinedo Torres, L. A., Jackson, L., and Parbhakar-Fox, A. (2022). Data Integration of Critical Elements from Mine Waste in Mexico, Chile, and Australia. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020122>.

Análisis del potencial de desarrollo del litio en Chile, Argentina y Bolivia ante los impactos del cambio climático

Camila Reyes¹, Emilio Castillo Dintrans¹, Luis Felipe Orellana Espinoza¹, Irene del Real Contreras²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 851, Santiago, Chile

(2) Universidad Austral, Instituto de Ciencias de la Tierra, Valdivia, Chile

En los últimos años, el cambio climático ha afectado globalmente la calidad de vida de las personas debido a fenómenos meteorológicos extremos. La minería es uno de los muchos sectores afectados por estos eventos. En este contexto, la minería de minerales estratégicos se ha impulsado para promover tecnologías energéticas bajas en carbono, lo que ha aumentado la demanda de metales de transición energética, como el litio. La creciente demanda de litio se debe al desarrollo de tecnologías y mercados emergentes, como las baterías de vehículos eléctricos. Esto destaca la necesidad urgente de estudiar los efectos del cambio climático y otros factores en la minería de litio.

Este estudio busca analizar los elementos que determinan el desarrollo de esta industria específicamente en salares de Argentina, Bolivia y Chile, cuantificando el impacto que puede tener el cambio climático, el potencial geológico, la gobernanza de cada país y aspectos socioambientales en este desarrollo. La importancia de esta investigación radica en que, hasta la fecha, las investigaciones que vinculan el cambio climático con la minería en esta zona son escasas. Para lograr cuantificar el efecto de estos factores en el desarrollo de la industria minera de litio se propone una metodología, basada en datos de acceso público, que otorga a cada factor un valor en una escala del 0 al 1.

En cuanto al potencial geológico, se obtiene que Bolivia es el país del triángulo del litio con un mayor potencial. En lo que respecta a la gobernanza, Chile es el país con mejor marco regulatorio para la minería, lo cual no necesariamente es sinónimo de tener el mejor marco regulatorio para la minería de litio en específico, ya que la buena gobernanza para la industria del cobre puede sobreestimar este valor. Respecto al factor socioambiental, se tiene que el país con más conflictos socioambientales alrededor de sus salares de litio es Chile. Por último, los resultados climáticos arrojan que en promedio, el país más afectado frente a amenazas de sequía y precipitaciones extremas es Bolivia.

Tras analizar los resultados, se evalúa la capacidad de esta metodología para reflejar la realidad actual de los salares. Se concluye que cada factor afecta la minería de litio de manera distinta. Se obtuvo que el factor de potencial geológico y el factor de gobernanza juegan un gran papel en el reflejo del desarrollo de la minería de litio, mientras que los conflictos socioambientales y los efectos del cambio climático parecen no tener relevancia alguna. Estas resoluciones deben ser tomadas con cautela ya que la metodología propuesta presenta diversas limitaciones y puede profundizarse y perfeccionarse para buscar obtener resultados más confiables.

Palabras Clave: litio, cambio climático.

Ocurrence of cobalt, cerium and lanthanum in cretaceous mineralized systems from Copiapó-Tierra Amarilla, northern Chile

Karl Riveros-Jensen¹, Israel Solís¹, Francisco Morales¹, Víctor Fritis², Miguel Narvaez²

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Avenida Copayapu 485, Copiapó, Chile

(2) Sociedad Punta del Cobre S.A., Rancagua 200, Copiapó, Chile

Introduction

The Cretaceous metallogenic belt of northern Chile has classically represented an important source of Copper, Iron and Gold, which are mainly hosted by IOCG-IOA ore-type deposits (e.g., Sillitoe 2003). This contribution provide new results about the occurrence and mineralogical controls of Cobalt (Co), Cerium (Ce) and Lanthanum (La) in Punta del Cobre, Sierra Ladrillos and Jesús María Cretaceous mineralized systems, in the Copiapó -Tierra Amarilla area, northern Chile.

Geological background

The Punta del Cobre district (Punta del Cobre, Mantos de Cobre and Granate mines) correspond to an IOCG mineralized system mainly hosted by a volcanic-sedimentary succession (Punta del Cobre Formation), where mineralized bodies are almost entirely associated with hypogene minerals (e.g. chalcopyrite, magnetite) which display both structural and lithological controls. The Sierra Ladrillos district is located ~4 km northeast from the Punta del Cobre district, where mineralized zones are hosted by sedimentary rocks of the Chañarcillo Group, displaying manto-type copper bodies (sulfides and "oxides"). Finally, the Jesús María District is located ~5 km southwest from the Punta del Cobre district, where the mineralized zones are related to magnetite-actinolite-apatite veins.

Methodology

In order to establish the geological context and define the most important mineralized zones, a geological mapping and sample collection were carried out in the three districts. Then, 50 polished and thin sections were studied by transmitted-reflected light microscope to precise the mineralogical assemblages and the relative chronology of hydrothermal events. All mineralized zones were analyzed by pXRF to detect and semi-quantify geochemical anomalies of strategic elements. Finally, in order to recognize the mineralogical controls of Co, Ce and La, a subset of 20 polished samples were subjected to SEM-EDS analyses.

Results

In the Punta del Cobre district, pyrite displays variable concentration of Co depending on its spatial position within the mineralized system. In Mantos de Cobre mine, the highest Co concentration in pyrite-rich zones reaches ~3000 ppm, whereas the median value is ~900 ppm. In Punta del Cobre mine, the highest Co value detected in pyritic zones is ~2000 ppm and the median value is ~500 ppm. Finally, pyrite-rich zones from Granate mine display a maximum Co concentration of ~1000 ppm and a median value of ~300 ppm. SEM-EDS results suggest a homogeneous Co distribution within pyrite crystals; however it is not possible to rule out that the absence of zonation could be associated with an insufficient resolution of the EDS system. Although pyrite occurrence can be associated with various discrete hydrothermal events, a temporal dependence of Co concentration within crystals is not evident. SEM-EDS results from Punta del Cobre mine, also demonstrate the presence of large crystals of Ce-rich allanite, showing sizes up to 200 µm, which occur on the edges of pyrite crystals in k-feldspar-chlorite-apatite-rich veins, whereas scarce and fine grained (5-10 µm) monazite crystals were also identified in fractures and interstitial spaces of magnetite, pyrite and chalcopyrite.

In the Jesús María district, Ce and La anomalies are exclusively related to monazite, which shows crystal sizes between 20 and 40 µm. Monazite crystals occur spatially associated with quartz, surrounding clusters of magnetite-apatite. The monazite-quartz association is also hosted by fractures in magnetite. These textural relationships suggest that most of monazite was deposited during a relatively later event within the IOA veins.

The hypogene zone of the Sierra Ladrillos district is dominated by chalcopyrite and pyrite, with minor amounts of euhedral crystals of Co-rich arsenopyrite which display crystals sizes between 500 and 25 µm. SEM-EDS results reveal a strong and well-defined zonation within Co-rich arsenopyrite crystals. This zonation is associated with Fe and Co fluctuations, which show an inverse spatial correlation, suggesting mutual substitution processes. SEM-EDS results also display U-rich zones spatially related to chalcopyrite, but it was not possible to establish their mineralogical controls.

Conclusions

Mineralogical and geochemical results obtained in study, indicate that Cretaceous magmatic-hydrothermal mineralized systems in the Copiapó-Tierra Amarilla area, were particularly efficient to concentrate Co, Ce and La. More petrological studies are necessary to reveal the mechanisms involved in these hypogene enrichment processes. Geometallurgical evaluations are also necessary to determine the recovery potential of these elements.

Keywords: Cobalt, Cerium, Lanthanum, Cretaceous, IOCG-IOA.

Financing: This contribution was funded by project FIC-FNDR 2018 from Regional Government of Atacama, Chile.

Acknowledgements: We thank PUCOBRE SA for providing technical and logistical support during field work and sampling activities.

References:

- Sillitoe, R.H. (2003) Iron Oxide-Copper-Gold Deposits: An Andean View. *Mineralium Deposita*, 38, 787-812. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>.

By-product cobalt potential in Chile and possible resources: Do they exist, can they be recovered?

Brian Townley¹⁻²⁻³⁻⁴

- (1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Tupper 2007, Santiago, Chile
 (3) Geo Analytical Vision S.A., Avda. Ricardo Lyon 3547, of. 202, Santiago, Chile
 (4) Centro de Estudios Minerales Estratégicos y Críticos de Chile, CEMEC

Chile has a long history in mining, at present the world's top copper producer. Despite the previous, past history indicates that other commodities have been and/or are also relevant, some of these highly important at present, in a global trend towards electro-mobility and non-conventional renewable energies. In this scenario, a focus on critical and/or strategic elements is vital, commodities such as Li, Co, Ni, REE, among many others, necessary for a new technological era that can hopefully reduce and mitigate the impacts of global warming.

In the past, from 1865 to 1944, Chile was a cobalt producer, having reached in the early 1900's productions as high as 12,000 metric tons per year. Since then, despite existing cobalt-bearing mineral resources, no production of cobalt has been reported, be it as primary ore or a by-product. Based on research carried out for the past six years, we present an integration of results focused on the potential sources for cobalt in Chile, primary copper-cobalt deposits of the Atacama and Coquimbo regions, potential by-product cobalt from Iron Oxide Copper Gold Deposits (IOCG), and potential cobalt recovery from IOCG and porphyry copper tailing deposits.

In primary copper-cobalt deposits the main cobalt-bearing minerals are cobaltite (cobalt-arsenic sulfosalt), erythrite (cobalt arsenate) and cobalt-bearing pyrite, with cobalt concentrations in ore deposits ranging from 0.4 to 3%, with 1% copper. Despite these high cobalt concentrations, the main challenge for the recovery of cobalt is metallurgical, in particular dealing with high arsenic concentrations that can easily range above 3%. Technologies to deal with these problems do exist, and can most likely be adapted to these deposits. In the case of IOCG type deposits cobalt concentrations are much lower, in a range from 50 to 150 ppm, but mostly contained within cobalt-bearing pyrite. Studies from IOCG tailing deposits and primary ore rock have shown that cobalt is contained within pyrite, at concentrations that range from 1000 to over 4000 ppm, in growth rims or at cores. Pyrite is a common gangue mineral that is usually sent to tailing deposits, yet these interesting cobalt concentrations could allow recovery, and at the same time it could avoid sending pyrite to tailing deposits. Considering the total amount of pyrite that is concentrated in copper sulfide processing plants and that are discarded to tailing deposits, Chilean IOCG mines could easily become relevant global cobalt producers, among the challenges at present, developing cost/efficient metallurgical recovery of cobalt from pyrite. Finally, studies from porphyry copper deposits have determined that primary cobalt concentrations in fresh tailing materials are low, 15 to 20 ppm. Yet, in copper sulfide concentrating plants cobalt concentrations in the cleaner stage may reach an order of magnitude higher (150 to 200 ppm), and determination of cobalt in pyrite has shown cobalt can reach 300 to 400 ppm in porphyry copper pyrite. Considering the volumes of pyrite that are discarded from the processing of minerals from these deposits, recovery of cobalt could yield significant production, economic viability yet to be evaluated.

In order to assess these potential cobalt resources and the possibilities of becoming a global competitive cobalt producer many steps in research and development are still required, but the present results do indicate that these potential resources exist, copper not the only commodity to be focused on.

Keywords: Cobalt Potential in Chile, By-product cobalt, IOCG deposits, Copper-Cobalt deposits.

Acknowledgements: We thank CORFO for direct funding of the Cobalt and Manganese Exploration Potential project and for grant funding of project CORFO PTECME66524.

Controles de la Mineralización de Cobre en el Yacimiento Carmen de Andacollo, Región de Coquimbo

Víctor Araya Araya¹, Marcelo Veloso², Fernando Álvarez², Rodrigo Castagno³

(1) Universidad de la República Oriental del Uruguay, Ciencias de la Tierra, Ciencias, Iguá 4225, Montevideo, Uruguay

(2) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(3) Universidad Nacional de Córdoba, Geología, Ciencias Exactas Físicas y Naturales, av. Velez Sarsfield 299, Córdoba, Argentina

La geología del yacimiento Carmen de Andacollo se reconoce ligada a los fenómenos tectónicos de fines del Cretácico Inferior y comienzo del Cretácico Superior, donde un cambio en la dirección de subducción durante el Aptiano-Albiano (Brown et al., 1991) habría generado un régimen compresivo con reactivación de estructuras NS de movimiento sinistral, que en el área de Andacollo permitiría la formación un sistema tipo dúplex extensivo (Araya, V. et al., 2021) conformado por los sistemas de Fallas Andacollo, Mariposa, Twila, y Carmen-La Fragua. De acuerdo con las dataciones disponibles, el emplazamiento del Batolito Tablalalume habría ocurrido durante el Albiano y estaría estrechamente asociado al origen del sistema mineralizador Andacollo-Los Negritos (Montes, M., 2016), favoreciendo en Carmen de Andacollo intrusiones porfíricas dacíticas y riolíticas, que en este trabajo se ha reconocido como los principales (aunque no los únicos) responsables de la mineralización de Cu. El evento compresivo del Campaniano (Emparan & Pineda, 2006) sería finalmente el responsable en CDA de los sistemas anastomosados de Fallas NE a NS (El Toro, Hermosa, El Churque) que segmentan los sistemas mineralizadores primarios y secundarios. La mineralización primaria temprana de Carmen de Andacollo es principalmente calcopirita-(bornita) diseminadas y en vetillas ("EDM") y calcopirita-pirita (vetillas "A"), mientras como mineralización primaria transicional se reconoce molibdenita-calcopirita (vetillas "B") y calcopirita-bornita (vetillas "SC" y "SGV"). Hacia las etapas tardías de la mineralización primaria, vetillas tipo "D" poco desarrolladas con pirita-(calcopirita) son posteriormente cortadas por mineralización pirita-tennantita-tetrahedrita en vetillas tardías tipo "E" (Araya, V. et al., 2012). Finalmente, vetillas de siderita y baritina con pirita-calcopirita-cinabrio se sobre imponen a todo el conjunto mineralizado primario. La mineralización secundaria está dada principalmente por calcosina y escasa covelina, con ausencia total de una zona de óxidos de cobre, debido probablemente a una alta humedad ambiental imperante y una relativa estabilidad de la tabla de agua del sector. Los procesos geológicos relevantes en Carmen de Andacollo cierran con movimientos normales de todos los sistemas anteriores generando en la parte central del yacimiento un esquema tipo horst-graben (Veloso, M. et al., 2015), atribuibles a los eventos extensivos del Maastrichtiano.

Palabras Clave: vetillas, Protore, Controles de mineralización

Agradecimientos: A Teck Resources Limited por facilitar la elaboración de este trabajo.

Referencias:

- Araya, V.; Veloso, M.; Gómez, C.; Valdivia, V.; Álvarez, F.; Montes, M. (2021). "Geología Actualizada del Yacimiento Carmen de Andacollo. Feria de Exploraciones y Minas, FEXMIN 2021.
- Montes, M.; Olivo, G.R.; Chamberlain, C.M.; Marques, J.C.; Creaser, R.A. (2016). "The Evolution of the Los Negritos Porphyry Copper Deposit, Coquimbo, Chile: Geological, Geochronological, Mineralogical and Geochemical Evidence. SEG 100 Conference.
- Jeraldo, C.; Schmidt, R.; Araya, V. (2015). "CART (Classification and Regression Tree) applied in Intrusive Rocks at Teck Carmen de Andacollo. XIV Congreso Geológico Chileno". La Serena, Chile.
- Veloso, M.; Araya, V.; Fuenzalida R.; Schmidt, R. (2015). Geología Estructural en Teck Carmen de Andacollo". XIII Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile.
- Araya, V.; Maldonado, A.; Astudillo (2012). "Geology of Carmen de Andacollo Deposit. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile.
- Maldonado, A.; Araya, V. (2012). Geological Model of Carmen de Andacollo Deposit: Methods and Improvements. XII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile.

Exploración Distrital (tipo “brownfield”) de Pórfidos Cupríferos en Chile

José Cabello Lechuga¹

(1) Centro de Estudios de Minerales Estratégicos y Críticos de Chile -CEMEC

En términos generales, hay dos categorías de exploración. En áreas antes inexploradas (tipo greenfields). Y en terrenos cerca o adyacentes a distritos con depósitos descubiertos anteriormente (tipo brownfield). La ventaja de la exploración distrital es que se pueden utilizar datos anteriores, basándose en ellos cuando sea necesario. Esto es considerablemente más barato y dado que gran parte de la actividad distrital ocurre cerca de cuerpos minerales en explotación, es posible que sea mucho más fructífero.

Los pórfidos de cobre son el tipo de mineralización más abundante en Chile. Depósitos de pórfido de cobre-molibdeno se encuentran en seis franjas longitudinales a lo largo de la Cordillera de los Andes, cada una representando un período metalogénico. Las franjas de pórfido son: Paleozoico Tardío-Triásico (298-230 Ma), Cretácico Inferior (132-97 Ma), Paleoceno-Eoceno Temprano (60-50 Ma), Eoceno Tardío-Oligoceno temprano (43-31 Ma) y Mioceno Tardío – Plioceno Temprano (12-4,3 Ma).

Los principales depósitos productores son de edad Cenozoica y están cronológica y espacialmente restringidos del Paleoceno al Eoceno temprano, del Eoceno medio al Oligoceno temprano y del Mioceno al Plioceno temprano. Estos cinturones no solo incluyen las zonas de enriquecimiento supergénico más grandes del mundo en Escondida y Chuquibambilla en el norte, sino también depósitos hipógenos de buena ley en Río Blanco-Los Bronces y El Teniente en el centro, estos últimos quizás los depósitos de cobre más grande del mundo.

En contraste, la mayoría de los depósitos de pórfido Cu-Mo más antiguos son actualmente sub económicos, a excepción de Cerro Colorado, Spence (Eoceno), Lomas Bayas. (Paleoceno), Andacollo y Dos Amigos, (Cretácico Inferior).

Se realizó una revisión de información pública que resultó en la identificación de varios descubrimientos tipo distrital. De ellos, 13 fueron seleccionados considerando su relevancia como esfuerzos exitosos de exploración técnica distrital junto con su importancia económica.

Los siguientes yacimientos fueron considerados: Rosario, Rosario Oeste y Ujina (Distrito Collahuasi), Ministro Hales (ex MM) y Clúster Toki (Distrito Chuquibambilla), Spence (Distrito Sierra Gorda), Esperanza y Encuentro (Distrito Centinela), Zaldívar-Escondida Norte y Pampa Escondida (Distrito Escondida); Damiana (Distrito El Salvador), Frontera (Distrito Los Pelambres), Los Sulfatos (Distrito Los Bronces-Río Blanco). Todos representan descubrimientos de tipo distrital ubicados entre 1 y 10 km de pórfidos de cobre conocidos completamente e incluidos en el distrito previamente conocido.

Además de los extraordinarios éxitos científicos y técnicos representados por los 13 descubrimientos descritos, hay que destacar su valor económico. Los descubrimientos representan la identificación de al menos 180 Mt de cobre fino más 16 Moz de oro más una cantidad importante pero aún por determinar de molibdeno.

Además, a la lista anterior se pueden agregar otros nuevos descubrimientos distritales importantes: Escondida Este, Pinta Verde, Baker (Distrito Escondida), San Enrique-Monolito, La Americana y Cerro Negro (Distrito Los Bronces-Río Blanco), La Huifa (Distrito El Teniente). En conjunto, esto hace que la exploración distrital de pórfidos de cobre en los Andes chilenos sea un éxito notable aún en progreso.

Palabras Clave: Exploración Distrital, Pórfidos Cupríferos.

Financiamiento: Mineralium.

Agradecimientos: Mineralium.

Magma evolution and fertility of the supergiant porphyry copper deposits from Central Chile: insights from PGE and zircon geochemistry

Yamila Cajal¹⁻², Ian Campbell², Carlos Carrasco-Godoy²

(1) University of Tasmania, Centre for Ore Deposit and Earth Sciences (CODES), Private Bag 79, Hobart, Australia

(2) Australian National University, Research School of Earth Sciences, 142 Mills Road, Canberra, Australia

Copper is used in every aspect of our society and its demand is increasing due to its critical role in the transition from fossil fuel to green energy. Porphyry copper deposits, which are the world's primary source of this metal, have been widely studied; however, it is still unclear why some porphyry systems are fertile while others are not. This work addresses this question by studying igneous rocks associated with the world's largest and third-largest copper deposits, the Rio Blanco and El Teniente Cu deposits, located in Central Chile, with special emphasis on the role that the timing of sulphide saturation plays in magma fertility. We provide new whole-rock, major and trace elements data, including platinum group elements, as well as zircon U-Pb ages and trace elements from intrusions related to these deposits. Our results show that the Rio Blanco and El Teniente magmatic systems share a similar magmatic evolution and that both systems were active for at least 4 My. The whole-rock geochemical data show that the regional and ore-related intrusions are co-magmatic. The fractionation of both systems was controlled by amphibole fractionation, with garnet playing a minor role. The zircon trace elements data show that the magmas, which gave rise to these deposits, were oxidized and had a high-water content that increased towards the later stages of magmatic evolution. Extensive fractional crystallization is interpreted to have occurred in the upper part of the lower crust, which is largely responsible for the increase in the water content of the magma. The platinum group elements geochemistry shows that the Rio Blanco and Teniente magmatic systems reached sulphide saturation early in their evolution. This depleted the magma in Au, relative to Cu, leading to the formation of Cu-dominated deposits. However, this early sulphide saturation did not prevent the formation of these supergiant porphyry copper deposits. Instead, we argue that the small amount of sulphide melt precipitation, together with the enormous size of the magma chambers and their long duration, were responsible for the formation of these supergiant deposits.

Keywords: porphyry, magma fertility, central Chile, Rio Blanco, El Teniente.

Acknowledgements: The authors would like to acknowledge the Andina and El Teniente divisions of CODELCO and the Exploraciones Mineras Andinas for providing the samples for this study.

Aproximación geoquímica de pórfidos del yacimiento epitermal de alta sulfuración Proyecto Cerro Búfalo, Baquedano, Región de Antofagasta, Chile

Tomás Francisco Zapatta Llanos¹, Juan Pablo Castillo Ramírez¹

(1) SQM S.A., Gerencia de negocios y exploraciones metálicas, El Trovador 4285, Las Condes, Santiago, Chile

El proyecto Cerro Búfalo corresponde a un yacimiento epitermal de alta sulfuración ubicado a 65 kilómetros al Sureste de la localidad de Baquedano y a 110 km al Este de Antofagasta, probablemente asociado a la franja metalogénica del Eoceno.

De las campañas de perforación realizadas en los últimos años, se ha interpretado que este depósito presenta mineralización de cobre en estructuras tipo “*ledges*” con altos valores de cobre-oro y arsénico evidenciado en la asociación pirita-enargita, esta última representa la mena principal. Producto del tamaño y el potencial económico, dado el contexto geológico de este depósito, surge la interrogante sobre la existencia de un sistema de pórfidos cupríferos que pudo haber estado asociado al desarrollo del epitermal de alta sulfuración Cerro Búfalo.

Con el análisis geoquímico de elementos trazas, tierras raras (REE), óxidos mayores y menores, se analizan las firmas geoquímicas de diversos pórfidos interceptados en Cerro Búfalo, asociarlos a edades conocidas en el proyecto, las cuales corresponden a 48 a 49 Ma, y correlacionarlos con una eventual campaña distrital que permitirá identificar familias de pórfidos, su temporalidad y capacidad de generar mineralización económica de cobre. A través de cortes transparentes, ha sido posible separar preliminarmente algunos pórfidos de Cerro Búfalo de familia de pórfidos dacítico a daciandesíticos. Destacan dentro de estas observaciones que los pórfidos presentan generalmente sericita como mineral de alteración principal producto de la profundidad a la que fueron interceptados, además de vetillas y diseminado de sulfuros primarios como calcopirita.

Este tipo de análisis se ha comenzado a utilizar con mayor frecuencia en los últimos años como método de exploración distrital, producto de su capacidad para generar vectores desde el punto de vista petrogenético, entregando así, interpretaciones gráficas de firmas geoquímicas que puedan estar asociadas a intrusivos productivos, en base al ploteo de ciertos elementos que indican procesos petrogenéticos asociados a la fertilidad de magmas productivos.

Palabras clave: Epitermal alta sulfuración, Geoquímica, Pórfidos.

Origen y movilización de metales en la subducción tardi-paleozoica chilena en el Sur de Chile (39°20' - 39°25' S)

Belén Arlette Garroz Martínez¹, Gaelle Plissart¹, José Meulén Piquer Romo¹, Daniela Kunstmann², Pablo Víctor Sánchez Alfaro¹, Pablo Becerra³

(1) Universidad Austral de Chile

(2) Asesorías y Servicios Geológicos GeoAustral

(3) Universidad de Concepción

El basamento metamórfico tardi-Paleozoico del Sur de Chile ha sido reconocido como un paleo-prisma de acreción activo en el margen suroeste de Gondwana durante el Paleozoico tardío. La Serie Occidental (P/T alta) corresponde a un grupo heterogéneo de rocas metamórficas acrecionadas en la base del prisma, dentro de las cuales, se encuentran preservados depósitos de metales base como sulfuros masivos volcanogénicos, metacherts ricos en Mn y formaciones de hierro bandeado. Datos geoquímicos como patrones de REE y elementos mayores indican que estas rocas formaron parte de sistemas hidrotermales submarinos, por ende, habrían sido enriquecidas en metales previo al ingreso en la zona de subducción. Sin embargo, también estas rocas pudieron enriquecerse o empobrecerse en metales durante el metamorfismo de subducción, principalmente, debido a la interacción de las rocas con fluidos metamórficos producidos por la desvolatilización de la corteza oceánica, o durante su evolución una vez acrecionados en el prisma. También, las litologías pueden enriquecerse o empobrecerse en metales por procesos posteriores a la acreción de estas rocas, como por ejemplo por la interacción de fluidos de origen intrusivo, que pueden desencadenar disolución-precipitación de los metales o incluso podrían estar enriquecidos en éstos, aportando metales a las rocas. Nuestros resultados indican que el oro presente como inclusiones en bordes y fracturas de pirita en metacherts, se formaría desde piritas auríferas (conteniendo Au invisible) y/o a partir de fluidos externos enriquecidos, provenientes de los sulfuros masivos. Las piritas auríferas pueden ser primarias o formarse durante la bajada en el canal de subducción y hasta la base del prisma, por un enriquecimiento de metales incluyendo oro desde los sulfuros masivos volcanogénicos cercanos. Luego, durante el metamorfismo retrógrado dentro del prisma de acreción, el oro invisible se liberaría como granos nativos de alta pureza (913-918‰) por procesos de disolución en dichas piritas, las cuales presentan fracturas que, a su vez, están rellenas por calcopirita. En la zona de estudio también existen intrusivos, lo cual indica que no se descarta la posibilidad de que haya interacción de fluidos de origen intrusivo con los metacherts y sulfuros masivos.

Palabras Clave: Metales, Oro, Metamorfismo, Subducción.

Financiamiento: Proyecto FNDR: "Transferencia Programa Desarrollo de la Pequeña Minería" (Secretaría Regional Ministerial de Minería, Región de los Ríos).

Hypersaline Fluid Inclusions in Clinopyroxene: Constraining Ore Fluid Composition and Genetic Models for Iron Oxide Apatite Deposits at El Lago, Central Andes, Chile

Allyson Murray¹, Adam Simon¹, José Tomás Ovalle¹, Martin Reich², Fernando Barra², Zoltan Zajacz³, Alexandra Tsay³

(1) University of Michigan, Department of Earth and Environmental Science, 1100 North University Avenue, Ann Arbor, USA

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) University of Geneva, Department of Earth Sciences, Rue des Maraichers 13, Geneva, CH

Iron oxide apatite (IOA) deposits are important sources of Fe and REEs, which are elements critical to the sustainable energy transition. Despite their economic and societal importance, IOA deposits lack an accepted model for ore formation. The Plio-Pleistocene El Lago deposit in the Central Andes of Chile is the youngest and best preserved IOA deposit found on Earth, providing an opportunity to study how these deposits form. El Lago is composed of six coeval massive magnetite ore bodies that have surface structures remarkably similar to effusive basaltic lava flows. Magnetite is the modally dominant mineral composing ~98% of the deposit, clinopyroxene is modally the next most abundant phase, and very minor apatite is present. El Lago has been the subject of many studies over the past sixty years, yet the genetic model is still hotly debated. Three contrasting genetic models for ore formation have been proposed: 1) Complete replacement of andesite by magnetite that precipitated from a hydrothermal fluid; 2) Crystallization of magnetite from an iron oxide magma that formed as a result of liquid immiscibility; 3) Formation via ascent of a magnetite-bearing brine. This project aims to constrain the ore fluid composition(s) from which the main stage magnetite and apatite crystallized, giving insight into genetic models for ore formation.

Field and chemical data provide partial support for each of these hypotheses. Here, we present a comprehensive petrographic and microanalytical study of fluid inclusions hosted in clinopyroxene phenocrysts in both the ore bodies and the host andesite at El Lago. This study analyzes samples from drill cores laterally throughout the deposit, providing the first documentation of fluid inclusions throughout the volume of the El Lago ore bodies. Ore bodies sampled include Lago Norte, Cristales Grandes, Extension Lago Sur, Pasos Blancos, Rodados Negros, San Vicente Alto, and San Vicente Bajo. Petrographic observations reveal an abundance of primary and secondary multi-phase fluid inclusions, containing a solid phase, a vapor phase, and daughter crystals. Freezing experiments failed to see a change in phase compositions of the fluid inclusions, suggesting one phase is an amorphous sodium-rich solid. Heating experiments show first melting ~400°C, and homogenization of some fluid inclusions ~740°C, while other fluid inclusions fail to fully homogenize upon heating to 1,100°C. LA-ICP-MS analyses reveal that the fluid trapped was ~40-48 wt% NaCl eq. and contains variable proportions of sodium/potassium, sulfur, and iron.

Keywords: fluid inclusions, iron oxide apatite deposits.

First report of a massive chromite from the Taitao ophiolite (Chile): an enigmatic origin leading to PGM and Y-REE phosphate crystallization

Gaëlle Plissart¹, Norikatsu Akizawa³, Manuel Schilling¹, Alexandre Corgne¹, Kuan-Yu Lin⁴, Alvear Maite², Catalina Marin², Emilio Gonzalez², Jessica Warren⁴

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Valdivia, Chile

(3) The University of Tokyo, Department of Ocean Floor Geoscience, Atmosphere and Ocean Research Institute, Kashiwa, Japan

(4) University of Delaware, Department of Earth Sciences, United States

Introduction

The Taitao ophiolite (5.6 Ma) is located near the Chilean triple junction in the Aysén Region. It displays a complete ophiolitic sequence tilted to the north, including from base to top, mantle peridotites, gabbros, a sheeted dyke complex and pillow lavas with sediments (Nelson et al. 1993). Here we report the first occurrence of a massive chromitite, which was sampled within the mantle section of the ophiolite. We performed detailed petrographic microscope and SEM observations coupled with EDS and EMPA analyses to unravel the complex paragenetic history registered in this rock, including the formation of platinum group minerals (PGM) and peculiar Y-REE phosphate minerals.

Occurrence of the chromitite

The chromitite was found in the mantle section of the ophiolite, near the transition zone with the lower oceanic crust. This section is composed mainly of harzburgites, dunites and less frequent clinopyroxenites, all of them crosscut by late pegmatitic gabbro dykes. Harzburgites and dunites show various degrees of serpentinization. The harzburgites generally display a well-developed foliation marked by pyroxene. The dunites consist of centimetric to decametric wide channels or more rounded, lentiform bodies, with a chromite internal foliation generally concordant with the harzburgite foliation. The clinopyroxenites are coarse grained and mainly made of concordant, centimetric to metric layers in the harzburgite.

The massive chromitite was not found *in situ* but the sample preserves the contact with an enclosing dunite. The chromitite lens is decimetric and clearly crosscuts the dunite spinel foliation (Fig. a). Moreover, in one of its borders, the chromitite displays a gradual, sinuous but concordant contact with a layer of clinopyroxenite (Fig. b).

Petrography and mineral chemistry

Chromitite

The chromitite is made of significantly altered chromite grains surrounded by an interstitial matrix of chlorite and recrystallized magnetite together with titanite (Fig. c). The chromite alteration occurred with a range of intensities, so that we distinguish 4 main types of grains (Fig. d).

Type-1 grains display the following zones (Fig. e1-2): (i) preserved high-Al cores ($Cr\# = 0.30-0.37$ for $Mg\# = 0.7-0.75$; mean TiO_2 of 0.11 wt%) grading to (ii) fine porous Cr-rich chromite ($Cr\# = 0.76$; $Mg\# = 0.03$) in sharp contact with (iii) homogeneous Fe^{3+} -rich chromite ($Fe^{3+}/Cr/Al$ ratios of 0.50/0.39/0.11, $Mg\# = 0$) grading to (iv) Cr-rich magnetite (0.91/0.08/0.01, $Mg\# = 0$). In terms of minor elements, zone (ii) displays a systematic increase in Mn, while zone (iii) shows an increase in Ti and V and drop in Mn and zone (iv) displays a drop in Ti. Pores of zone (ii) are small and filled with chlorite.

Type-2 grains (Fig. f1-2) are similar to the Type-1, except that they do not show the porous zone (ii), meaning that the core is in sharp contact with the homogeneous zone (iii). Also, although the cores were optically identified as homogeneous, they actually show a significant change in $Mg\#$ (down to values of 0.06) for globally unchanged $Cr\#$ (0.39-0.49, slightly higher than the unaffected cores of type-1 grains, see Fig. d). This implies that important sub-solidus re equilibration affected the $Mg\#$ of these grains. Minor elements display variations similar to those of type 1 grains, except the Mn increase associated with zone (ii), which is lacking.

Type-3 grains (Fig. g) consist of two zones, a core made of very porous Fe^{3+} -rich chromite ($Fe^{3+}/Cr/Al$ ratios of 0.60-0.80/0.37-0.19/0.23-0.01, $Mg\# = 0$) and a rim made of Cr-magnetite (0.91/0.08/0.01, $Mg\# = 0$). The pores are squared-shaped and bigger than in type-1, and filled with titanite, Mg-Fe hornblende, chlorite, ilmenite and lizardite.

Type-4 grains consist of smaller, homogeneous Cr-magnetite grains, growing in coalescence and forming grain triple junctions (Fig. h). They often show a diminished relict core of Fe^{3+} -rich chromite.

Silicate inclusions inside the unaltered chromite cores are rare ($n = 9$) and made of olivine ($Mg\# = 0.90-0.94$), diopside ($Mg\# = 0.91$), enstatite ($Mg\# = 0.87$) and plagioclase ($X_{An} = 0.74-0.86$). Magnesio-ferro hornblende is observed as inclusions inside type-3 chromite. Euhedral Ru-Os-Ir sulphides (laurite-erlichmanite, $n = 4$) that are 2 to 5 microns in size (Fig. i) and (Pb, Fe)S were found inside the Cr-magnetite chromite rims and the Cr-magnetite grains. No other sulphide phases have been found in the chromitite lens so far.

The matrix of the chromitite is characterized by the growth of large, zoned (inversely correlated Fe- Os) titanite (up to 4 mm), which include the already altered chromites and the Cr-magnetite grains (Fig. c).

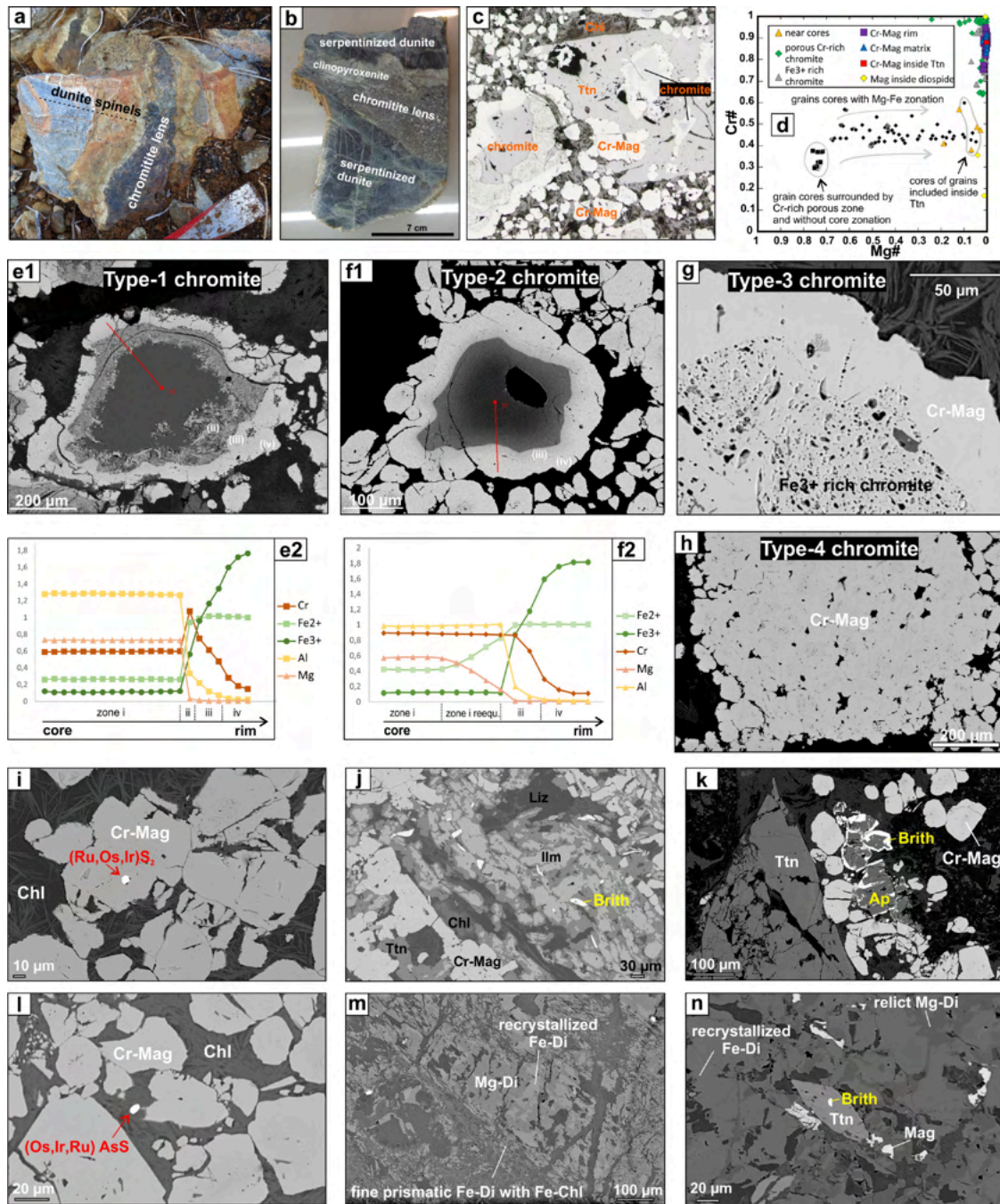


Figure. a) Field occurrence showing the chromitite lens crosscutting the dunitic foliation. b) Hand specimen displaying the relationship between the chromitite lens and the clinopyroxenite layer. c) Microphotography in reflected light showing typical aspects of the chromitite. d) Cr# versus Mg# for chromite cores (black) and chromite alteration products (colors). e) Microphotography of Type-1 chromite in SEM and the corresponding profile. f) Microphotography of Type-2 chromite in SEM and the corresponding profile. g) Type-3 chromite. h) Type-4 chromite. i) Grain of laurite-erlichmanite inside Cr-magnetite in SEM image. j) Destabilization of ilmenite in titanite and occurrence of britholite. k) Britholite rimming apatite grains. l) Grain of Os-Ir-Ru sulpharsenide inside the chloritic matrix. m) Diopside layer adjacent to the chromitite, showing destabilization of Mg-rich diopside in Fe-rich diopsides. n) Titanite inside the clinopyroxenite layer, with inclusion of britholite.

The cores of chromite inclusions in these titanites show more pronounced re equilibration in Mg# (0.04-0.09 for Cr# of 0.36-0.56) (Fig. d). Titanite also occurs replacing large ilmenite grains (Fig. j), which very rarely show rutile inclusions. Few Fe-rich diopside (Mg# = 0.61-0.86) were found as inclusions in titanite. Two populations of chlorite (clinocllore-daphnite) were found in the matrix (Mg# = 0.70-0.93 and Mg# = 0.44-0.66, respectively). Late small pure magnetite grains are observed in association with Fe-chlorite. Euhedral apatites are found in close association with titanite and Cr-magnetite grains (Fig. k). They are rimmed by a Y-REE-rich phosphate (solid solution between Y- and Ce- britholite, Fig. k), which is also found as inclusions inside titanite (Fig. j) or in the matrix. Rare late Ti-V-Y-bearing hydro-andradite is observed in the matrix. Finally, anhedral rounded Os-Ir-Ru sulpharsenides (Ir-rich osarsite, n = 3) 1 to 5 micrometers in size are observed inside the chloritic chromite matrix (Fig. l). A PGM grain included in Cr-magnetite but in contact with the chlorite matrix is reequilibrated to an Os-rich sulpharsenide.

Clinopyroxenite

The clinopyroxenite layer is made of Mg-rich diopside ($Mg\# = 0.90-0.96$), which is partially altered into two populations of Fe-rich diopside (Fig. m): (i) small, oriented, anastomosing grains around relict diopside porphyroclasts ($Mg\# = 0.81-0.86$) and (ii) grain rims and large recrystallized grains ($Mg\# = 0.64-0.79$). Compared to the Mg-diopside, the Fe-diopside displays characteristic enrichment in Na_2O (up to 0.67wt%) and Al_2O_3 (up to 1.72wt%). Pure magnetite and Co-pentlandite are frequently found as inclusions inside Mg-rich diopside. Small titanites are observed as inclusions inside the two populations of Fe-rich diopside, and these can include britholite (Fig. n). The two chlorite populations are also observed in this layer and serpentine is common.

Discussion

Our results indicate that the chromitite formed and evolved at least in two stages. The first stage is preserved in chromite cores and inclusions, as well as in the clinopyroxenite layer. The main mineral assemblage is Al-rich spinel + $Fo_{0.90-0.94}$ + En + Mg-rich Di + $An_{0.74-0.86}$ + Ilm and points to a magmatic origin. The chromitite was closely related to the clinopyroxenite layer, as indicated by similar $Mg\#$ between diopside inclusions in chromite grains and Mg-diopside relict grains in the layer. The process of chromitite formation in ophiolites is still debated and probably not unique (González-Jiménez et al. 2014). One commonly accepted mechanism involves the mixing, in a permeable dunitic conduit, of a primitive melt and a silica-rich evolved melt, leading to the magmatic crystallization of chromite (e.g. González-Jiménez et al. 2014). Another recent model advocates for a hydrothermal origin for Oman chromitites, with a spatial link to diopsidites, but with the presence of grossular garnet and an interstitial habit of the chromite with respect to the Cr-rich diopside grains (Akizawa and Arai 2014; Arai et al. 2020). No PGMs were found in these hydrothermal chromitites (Arai et al. 2020). Also, these hydrothermal diopsidites occur as dykes in the mantle, with a skarn texture, no sulphides and a very high $Mg\#$ (0.95-1.00; Python et al. 2007), whereas in Taitao the diopside $Mg\#$ is lower (0.90-0.96) and the layer contains abundant Co-pentlandite. We propose that the Taitao chromitite is magmatic in origin as we did not find hydrothermal characteristics in the chromitite, but rather silicate inclusions typical of a MORB magma. However, it would differ from other magmatic chromitites because no systematic inclusions of hydrated, Na-rich silicates (aspidolite, pargasite) in addition to olivine and pyroxenes have been found so far in the Taitao chromitite. These inclusions are generally interpreted to be associated with an evolved, silica- and Na-rich, hydrated melt mixing with a primitive melt, which leads to the chromitite precipitation (e.g. Arai and Miura, 2016). It is possible that such silica- and Na-rich melt was not present at Taitao, however, the scarcity of primary inclusions encountered could skew this interpretation. Additional EMPA analyses are underway to fully identify all the inclusions. The magmatic origin would also be supported by the PGE sulphides included in the chromites. Although now inside the Cr-magnetite grains and rims, their euhedral morphology indicates that they were entrapped inside the chromite crystals during their primary growth, and further resisted modifications during alteration. Additionally, the presence of ilmenite in the chromitite lens could be linked to the clinopyroxenite formation. In the Moa-Baracoa ophiolite (Cuba), chromitites underwent an intense Fe-Ti-Zr metasomatism by reaction with an incoming HFSE-rich gabbroic melt, forming Cr- Fe^{3+} -Ti-rich chromite, Ti-rich amphibole, orthopyroxene, olivine, Mg-rich ilmenite, large Fe-Cu-Ni sulfides, zircon and Y-REE zirconolite (Pujol-Solá et al. 2020). This assemblage is not strictly comparable to the one observed in the Taitao chromitite, however this process can explain the enrichment in Y-REE and the formation of magmatic ilmenite and apatite. In our case, the melt could correspond to the clinopyroxenite layer, possibly representing a cumulate. Another possibility is that one of the melts involved in the chromitite crystallization directly corresponds to a HFSE-rich magma. In that case, the primary assemblage will directly contain ilmenite and apatite, and other possible HFSE-rich phases, without the need of a metasomatic stage. LA-ICP-MS analyses on diopside, ilmenite and apatite are underway and should shed light on these hypotheses.

The Al-rich composition of the Taitao chromitite is comparable to those formed at mid-ocean ridge (MOR), in which chromitites are typically small and rare (González-Jiménez et al. 2014). The composition of the melt from which the chromitite would have crystallized was calculated using the classical equations of Maurel and Maurel (1982), Rollinson (2008) and Kamenetsky et al. (2001). It is similar to a MORB, which further supports a ridge origin, although with higher Al contents (Al_2O_3 18.2 wt%; TiO_2 0.37 wt%; FeO/MgO 0.76). The presence of chromitites inside the Taitao mantle confirms that the spreading rate was at least intermediate, to produce Cr-rich melts by high degree of partial melting. Also, the lack of Na-rich hydrated inclusions characteristic of Cr-rich chromitites from supra-subduction zone (Arai and Miura, 2016) indicates that the chromitite formed during the production of the Taitao oceanic lithosphere in the ridge axis. Thus, the chromitite formation is not related to possible subduction-influenced magma intrusions after the tectonic underplating event, which placed the ophiolite in a structural position above the slab (Lagabrielle et al. 2000). No rare high-P minerals like diamond have been found so far in the Taitao chromitite, for which we assume that the chromitite formed as part of the ophiolitic sequence and not from recycling of deep chromite grains (Arai and Miura, 2016).

The second stage of chromitite formation is characterized by the mineral assemblage of Ttn + Cr-magnetite (each phase included in the other) and the destabilization of Mg-rich silicates into Fe-rich silicates. It occurred after a first hydration event that is still preserved locally in the porous Cr-chromite (zone ii of Type-1 chromite), which produced fine chlorite and probably also the first alteration of the silicate matrix. However, this fine porous zone has been mostly refilled by homogeneous Fe^{3+} -rich chromite and Cr-magnetite (Gervilla et al. 2012). The crystallization of the Cr-magnetite rims and the new very porous Fe^{3+} -rich chromite (Type-3), with inclusions of titanite, chlorite and amphiboles indicate that all these phases are paragenetic. The very high mode of Cr-magnetite grains and their coalescence making triple junctions, as well as the Fe-rich populations of diopside and chlorite, likely indicate the presence of a Fe-rich percolating fluid, in addition to Fe being provided by chromite destabilization. The same probably occurred for the crystallization of large titanite grains, where Ti was provided by ilmenite and chromite destabilization and Ca could come from primary plagioclase/clinopyroxene. Or the incoming fluid. During this stage, the Ru-Os-Ir sulphides in the matrix were destabilized into Os-Ir-Ru-Rh sulpharsenides, which is typically observed in other chromitites worldwide (González-Jiménez et al. 2014). The Os contents in titanite could come from micro-scale remobilization of PGE. For apatite, it is not clear if it belongs to the primary assemblage or to this alteration event, as explained before. The formation of the peculiar Y-REE-rich phosphate is associated with this second event because they are found as inclusions in titanite and as rims on apatite grains and fractures. It is the first record of britholite founded inside chromitite.

Generally, this mineral is found in granites, syenites, alkaline volcanic rocks, carbonatites, and their metasomatic products (Uher et al. 2015). In these rocks, it can form by the alteration of apatite, producing similar rims as the one observed here (Uher et al. 2015). Two main possibilities can explain the origin of the Y and REE enrichment in the Taitao chromitite: (i) these elements were already present in the rock before the alteration, hosted in ilmenite or apatite, or in a Y-REE phase that completely broke down during the alteration (for example, zirconolite like in Pujol-Solá et al. 2020), or (ii) these elements were brought by the fluid responsible for the alteration of chromite and ilmenite. Interestingly, the hydrothermal diopside in Oman is thought to have precipitated from a fluid enriched in REE, Sr, Zr, Ti and Y (Akizawa and Arai, 2014). Such a fluid could potentially explain the origin of the britholite. However, we prefer a magmatic origin for the Taitao diopside, hence the first option for the origin of the britholite. This is further supported by the absence of exotic minerals in the dunitic envelope surrounding the chromitite and clinopyroxenite, given that percolation of an external fluid should also have affected these lithologies. Future LA-ICP-MS analyses on apatite, ilmenite and titanite will contribute to a better understanding of this process. As a conclusion, although rare, the presence of Y-REE minerals in chromitite would not necessarily imply the involvement of an exotic (external to the ophiolite) magma or fluid.

Keywords: Taitao ophiolite, Al-rich chromitite, PGMs, Y-REE phosphate.

Financing: Fondecyt Regular 1211820VIDCA investigadoras MUJ-INV-2023-04.

References:

- Akizawa, N. et al. (2014) Petrology of mantle diopside from Wadi Fizh, northern Oman ophiolite: Cr and REE mobility by hydrothermal solution. *Isl. Arc* 23, 269–280.
- Arai, S., et al. (2016) Formation and modification of chromitites in the mantle. *Lithos* 264, 277–295.
- Arai, S. et al. (2020) Hydrothermal Chromitites from the Oman Ophiolite: The Role of Water in Chromitite Genesis. *Min.* 10, 217.
- Gervilla, F., et al. (2012) Formation of ferrian chromite in podiform chromitites from the Golyamo Kamenyane serpentinite. *Contr. to Min. and Pet.* 164(4), 643–657.
- González-Jiménez, J.-M., et al. (2014) Chromitites in ophiolites: how, where, when, why?, Part II. A review and new ideas on the crystallization of chromitites. *Lithos* 189, 140-158.
- Kamenetsky, V.S., et al. (2001) Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: An Empirical Study of Associated Olivine, Cr-spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks. *J. of Pet.* 42 (4), 655-671.
- Lagabriele, Y., et al. (2000) Magmatic-tectonic effects of high thermal regime at the site of active ridge subduction: The Chile Triple Junction model. *Tect.* 326, 255–268.
- Maurel, C. et al. (1982) Étude expérimentale de la solubilité du chrome dans les bains silicatés basiques et sa distribution entre liquide et minéraux coexistants. *Bull. Min.* 640-647.
- Nelson, E., et al. (1993) Taitao ophiolite: a ridge collision ophiolite in the forearc of southern Chile (46°S). *Rev. Geol. de Chile* 20 (2), 137–165.
- Pujol-Solá, N., et al. (2020) Fe-Ti-Zr metasomatism in the oceanic mantle due to extreme differentiation of tholeiitic melts (Moa-Baracoa ophiolite, Cuba). *Lithos* 358–359, 105420.
- Python, M., et al. (2007) Oman diopsidites: A new lithology of very high temperature hydrothermal circulation in mantle peridotite below oceanic spreading centres. *Earth Planet. Sci. Lett.* 255, 289–305.
- Rollinson, H. (2008) The geochemistry of mantle chromitites from the northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions. *Contr. to Min. and Pet.* 156 (3).

Critical element deportment in supergiant porphyry Cu-Mo deposits

Martin Reich¹, Jorge Crespo¹⁻², Constanza Rivas¹, Fernando Barra¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
 (2) Colorado School of Mines, Mining Engineering Department, 1600 Illinois St., Golden, Colorado, United States of America

Porphyry Cu-Mo deposits are the world's most important source of Cu, Mo and Re, and are also major sources of Au and Ag. Previous studies have reported that some porphyries can have sub-economic to economic grades of critical metal(loid)s—e.g., Co, Ni, In, Ga, Ge, Bi, platinum group elements, PGE and REE—which are both essential for the green energy transition and subject to the risk of supply restriction. Reconnaissance studies have focused predominantly on porphyry Cu-Au deposits, and there has been a lack of systematic mineralogical and geochemical investigations of critical element deportment in porphyry Cu-Mo systems. These data are key to understanding the distribution and concentration of such elements at the deposit scale, and their occurrence within sulfide host phases in relation to mineralization events and the intensity of hydrothermal alteration.

Here we focus on the mineral chemistry of Cu-(Fe) sulfides from two supergiant porphyry Cu-Mo systems in central and northern Chile, the Río Blanco and Chuquicamata deposits, respectively. Statistical examination of extensive drill hole ICP-MS datasets is a first step towards identifying major elemental trends at the deposit scale. Based on these results, drill core samples of all major hydrothermal events are selected for in-situ microanalysis using (FE)SEM, EMPA and LA-ICP-MS. To ensure representativeness, sample selection takes into consideration the spatial distribution of alteration and mineralization events, as well as sulfide paragenesis.

At Río Blanco, critical elements of economic interest in Cu-(Fe) sulfides include Ag, In, Bi, Sb, Co, Ni, Se, Te, Au and Pd [1, 2]. Among these, Bi and Se occur in the 10-100's of ppm range in chalcopyrite, locally reaching 1,000's of ppm in bornite and Cu sulfosalts. Indium and Co, on the other hand, are ubiquitous in chalcopyrite and pyrite, respectively. Indium attains 10's of ppm in chalcopyrite and Co occurs at the 100-to-1000 ppm range in pyrite. Gold is mostly present in pyrite (up to 10's of ppm). In addition, Pd-bearing nanoparticles hosted within bornite and chalcopyrite were identified in the potassic zone. The highest concentration of trace elements in chalcopyrite is associated with the high-temperature potassic alteration stage (e.g. Ag, In), while trace element contents in bornite are higher in the moderate-temperature gray-green sericite alteration (e.g., Ag, Bi). Cobalt, Ni, and Te tend to be more concentrated in pyrite from the gray-green sericite alteration, whereas Se, Cu, As, and Ag are higher in late-stage pyrite from the quartz-sericite zone. Late Cu sulfosalts host significant concentrations of trace elements, particularly the tennantite-tetrahedrite series (e.g. Ag, Bi, Cd, Co, Hg).

At Chuquicamata, sulfide trace element data show a similar partitioning behavior [3]. Most of the elements detected show a similar range of concentration in the studied sulfides, usually <1000 ppm, although wt.% levels are often detected. Chalcopyrite is the main Cu ore phase in the deposit, hosting 10's of ppm contents of In, Ag, Sn, and Pb (and sporadically, wt%-level Se contents). Higher concentrations of Se, In, Pb, and Sn in chalcopyrite are related to the high temperature background potassic alteration, whereas lower contents of these elements are associated with the lower temperature quartz-sericite and chlorite alterations. Bornite is a significant carrier of Ag, Bi, Pb, and Sn. Higher concentrations of Ag and Sn in bornite are associated with the intense potassic alteration, whereas lower concentrations of those elements are observed in the background potassic alteration. In comparison, pyrite contains the largest diversity of trace elements, with up to 100-1000's ppm of Co and Ni, and generally low but occasionally elevated Cu, As, Sb, and Pb contents. No PGE-bearing minerals were observed, but Sn and W mineral inclusions (scheelite and wolframite) were observed in chalcopyrite and bornite.

In conclusion, our data indicate that variations in the concentration of critical elements in ore and gangue sulfides at the Río Blanco and Chuquicamata porphyry deposits are closely related to the main stages of hydrothermal alteration and Cu mineralization and vary as a function of temperature and intensity of alteration. Given the large size of porphyry deposits and the large number of porphyry Cu-Mo systems in Chile and elsewhere, these deposits will become increasingly important suppliers of some critical metals. For this to take place, statistical analysis of drill core datasets, detailed mineralogical and geochemical studies similar to ours are required to assess the potential of other porphyry deposits as sources of critical metals, and to evaluate the economic recovery of the by-product elements.

Keywords: Critical elements, Porphyry Cu-Mo, Sulfides, Trace elements, LA-ICP-MS.

Financing: This study was funded by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) through Millennium Science Initiative Program (NCN13_065).

Acknowledgments: We thank CODELCO (Andina, Chuquicamata, and Gerencia de Exploraciones) for providing access to the deposits and drill core samples, and for sharing drill core mapping and geochemical data.

References:

- [1] Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., Martinez, C. (2018) Critical metal particles in ore sulfides from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile. *Minerals*, v. 8, 519.
- [2] Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., Martinez, C., Leisen, M., Romero, R., Morata, D., Marquardt, C. (2020) Occurrence and distribution of silver in the world-class Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Central Chile. *Economic Geology*, v. 115, 1619-1644.
- [3] Rivas-Romero, C., Reich, M., Barra, F., Gregory, D., Pichott, S. (2021) The relation between trace element composition of Cu-(Fe) sulfides and hydrothermal alteration in a porphyry copper deposit: insights from the Chuquicamata Underground mine, Chile. *Minerals*, v. 11, 671.

In-situ trace element and textural analysis of pyrochlore and its use to decipher the origin of carbonatite-hosted niobium deposits

Felipe Velásquez Ruiz¹, Martin Reich¹, Sam Broom-Fendley², Charles D. Beard³, Fernando Barra¹, Pedro Cordeiro⁴, Rurik Romero¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) University of Exeter, Camborne School of Mines, Penryn, United Kingdom

(3) University of Cambridge, Department of Earth Sciences, Cambridge, United Kingdom

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Santiago, Chile

Abstract

Niobium (Nb) is a strategic lithophile transition metal, belonging to the group of the so-called High Field Strength Elements (HFSE). Approximately three-fourths (75%) of the world's production of Nb is dedicated to the manufacturing of ferroniobium: (i) as a crucial alloy used to enhance various steel properties, i.e., strength, toughness, corrosion resistance, and formability, and (ii) development of nickel-, cobalt- and iron-based superalloys. The remaining 25% of the Nb production is used for special applications, including train levitation or magnetic resonance imaging.

More than 90% of the global Nb production is related to the extraction of pyrochlore $[(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})]$ from the alkaline-carbonatite complexes of the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) in Central Brazil. Since the production of Nb is mostly restricted to a single country, it is considered a critical element with shortcomings in global supply and therefore is not traded as a commodity on the world stock market. In the APIP, the pyrochlore ore is found mainly in magnetite-apatite-tetraferriphlogopite-rich rocks or "phoscorites", which are associated with carbonatites. There are also traces of pyrochlore in post-magmatic carbothermal veins. Despite its relevance as the main Nb ore phase, few microanalytical data of pyrochlore are currently available and consequently the trace element signature of pyrochlore in Nb deposits remains unconstrained. This particularly limits our understanding of the genesis of pyrochlore-rich phoscorite within the APIP, which is the world's largest Nb province. To bridge this gap of knowledge, we hereby present a mineralogical and geochemical investigation of pyrochlore from the Boa Vista Nb Mine, in the Catalão II Complex of the APIP. We carried out microtextural observations of pyrochlore using scanning electron microscopy (SEM) and optical cathodoluminescence (CL) with electron microprobe analyses (EMPA) and wavelength dispersive spectrometry (WDS) maps. These data were complemented with EMPA and LA-ICP-MS analyses of pyrochlore crystals from magmatic and carbothermal lithotypes.

The SEM and CL images of pyrochlore within magmatic and carbothermal rocks from Boa Vista revealed several microtextures. Oscillatory textures were observed in pyrochlore from the carbonatites while patchy-zoned grains were observed in pyrochlore from phoscorites. Textures indicative of reprecipitation (and skeletal secondary pyrochlore grains) were only locally recognized in these rocks. Carbothermal veins, on the other hand, are characterized by unzoned pyrochlore grains.

The major and trace element data of pyrochlore reveal a predominance of calciopyrochlore, i.e., the Ca- and Nb- endmember. Other substitutions include Na, Sr, Th, and rare earth elements (REE) by Ca, and Zr and Ti by Nb. Geochemical trends of pyrochlore defined by Sr/Y vs. La, Na vs. Ce and Zr vs. Hf display a fractionation trend with no decoupling, indicating no evidence of immiscibility during magmatic fractionation. In addition, the REE-normalized data of pyrochlore are homogeneous and consistent with lithogeochemical results from carbonatite and phoscorite rocks from the neighboring Morro do Padre Nb mine. These data suggest a magmatic origin for pyrochlore in the carbonatites and phoscorites at Boa Vista, including as well the pyrochlore xenocrysts in the carbothermal veins. Since our data do not seem to point towards immiscibility process or the formation of a truly phoscoritic liquid, we suggest that it is likely that pyrochlore from Boa Vista –and hence their host phoscorites– formed by segregation of denser minerals within a parental carbonatitic magma.

Keywords: phoscorite, carbonatite, carbothermal vein, Catalão II Complex, Alto Paranaíba Igneous Province (APIP).

Franja Mineralizada Nororiental, Distrito El Teniente

Ricardo Vergara Araya¹, Juan Carlos Toro George¹, Ángel Aguilar Catalano²

(1) Exploraciones Mineras Andinas S.A., Avenida Vitacura 2670 Oficina 902, Las Condes, Chile

(2) Codelco-Chile, Gerencia Corporativa de Exploraciones, Huérfanos 1270, Santiago, Chile

RESUMEN

Como parte de los resultados de la exploración en el Distrito El Teniente de la última década, se presenta una franja mineralizada poco conocida, desarrollada en el sector Nororiental del Distrito, agrupando entre otros, los sectores de La Huifa y Filo Norte – La Negra, todos ellos relacionados al contacto entre el Intrusivo Sewell y las rocas estratificadas del Complejo Volcánico Teniente.

DESCRIPCIÓN FRANJA NOR-ORIENTAL

En el área se identifican eventos de alteración/mineralización, en general homologables a los presentes dentro del yacimiento El Teniente. Se reconocen distintos tipos de brecha hidrotermal, principalmente de cuarzo-turmalina, con mineralización de calcopirita-bornita+molibdenita. Las brechas hidrotermales, que muestran fuertes evidencias de reutilización con aporte sucesivo de sulfuros, corresponden a feldespatos potásico-actinolita-magnetita-apatito (tempranas), turmalina-albita-cuarzo-feldespatos potásico (+sericita) y anhídrita-turmalina. Además se identifica en profundidad el desarrollo de mineralización de calcopirita-bornita+calcosina hipógena, diseminada y en vetillas tempranas, tipo pórfido cuprífero, tanto en rocas de la secuencia volcánica como en una serie de intrusivos porfídicos dioríticos a tonalíticos y, en menor medida, monzodioríticos.

Las brechas hidrotermales, también muestran diferencias significativas en su morfología y orientación: Por una parte, el evento principal de mineralización Cu-Mo en el Sector La Huifa se asocia con el desarrollo de brechas de forma muy irregular, de orientación en general NNW/subvertical, donde el esfuerzo regional fue superado por la presión local de fluidos (Piquer et al., 2022). Por otro lado, en el sector noreste, La Negra – Filo Norte, las brechas hidrotermales, y en particular las que presentan mineralización relevante, muestran un fuerte control estructural N50-80W, en correspondencia con las estructuras y lineamientos mayores identificados, y se caracterizan por tener corridas entre 100 y 400 m, con espesores entre 20 y 50 m. Este sistema estructural tiene relación en su orientación con el sistema de falla Codegua (Rivera y Falcón, 1998).

Además, se identifican diferencias entre el control principal de la mineralización, homologables a ciertas etapas del desarrollo de un sistema tipo pórfido cuprífero, como para el sector de La Huifa, donde el control principal está dado por un evento de brechización de anhídrita-turmalina-sulfuros asociada a una fuerte alteración clorítica-sericitica, con una mayor importancia bajo la cota 2.720 m s.n.m. En el sector cercano a la laguna Negra, las brechas de turmalina presentan una reactivación mediante un evento tipo “C”, con un alto volumen de calcopirita en la matriz de brechas, reemplazo en clastos y en halos de brechas junto a sericita gris verde y clorita; también se presentan vetillas análogas, con un desarrollo máximo a una cota mayor a 2.800 m s.n.m. En el extremo norte, a cotas similares, dominan brechas de turmalina-cuarzo-feldespatos potásico-albita-cuarzo con mineralización de calcopirita-bornita y abundante molibdenita.

Finalmente, se dispone de una serie de edades radiométricas que dan cuenta de la edad de mineralización (Re-Os en molibdenita), las brechas de alta ley de La Huifa presentan un rango 6,64-6,51 Ma (Pardo, 2015), y en el sector de La Negra – Filo Norte, en brechas de alta ley Cu-Mo y vetillas relacionadas, se obtienen edades entre 7,34 y 6,69 Ma.

Se propone que la combinación de factores como el contacto Intrusivo Sewell-Complejo Volcánico Teniente y la presencia de sistemas estructurales favorables constituyen un primer control de la mineralización en el área.

Palabras Clave: El Teniente, Franja Mioceno-Plioceno Chile Central, Pórfido Cuprífero, Brechas Hidrotermales.

Referencias:

- Pardo, R., 2015, Discovery and geology of La Huifa porphyry Cu-Mo deposit, VI Región, Chile. Actas del XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, 2015, p. 368.
- Piquer, J., Hermosilla, J., Oyarzún, N., Cuadra, P., Floody, R., Troncoso, L., y Pardo, R., 2022. Geology and structural evolution of the La Huifa ore deposit, Central Chile: A newly discovered porphyry Cu-Mo system in the El Teniente District. Economic Geology 118 (2), 2022, p. 371–390.
- Rivera, O., y Falcón, M.F., 2000. Secuencias de relleno de cuencas volcanotectónicas transversales Oligo-Miocenas en los alrededores del yacimiento El Teniente (33°45'-34°30' LS). Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, Chile, 2000, p. 819–823.

Permeabilidad y conductividad eléctrica de los reservorios tipo mush en St. Kitts, Lesser Antilles

Claudio Contreras Hidalgo¹⁻², Rubén Cartagena³, Alison Rust²

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(2) University of Chile, School of Earth Sciences, Bristol, UK

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Los mush magmáticos son redes de cristales interconectados que permiten flujo intersticial multifase que consisten en fundido silicatado y fluidos exsueles. Comprender la eficiencia de la migración de la mezcla de fundido y fluido requiere el análisis de muestras análogas y experimentos numéricos porque, en la mayoría de los casos, los mushes no pueden ser eruptados como un todo. Excepcionalmente, los gabros de hornblenda de St. Kitts tienen una masa fundamental intersticial que incluye microcristales, vesículas y vidrio silicatado lo que refleja cristalización, exsolución de volátiles y fundido silicatado remanente durante el transporte de fluido y fundido a través del mush. Mediante tomografía de rayos X en 3D y considerando las muestras de mush como un medio de una fase sólida y una fase líquida, se mide la porosidad y la conectividad de poros de mush y se realizan simulaciones de permeabilidad y conductividad eléctrica. La porosidad es 0,06-0,31 (cristalinidad = 0,69-0,94) y, excepto por una muestra, 81-98% de la porosidad del mush forma trayectorias de flujo conectadas. La permeabilidad va de 5×10^{-13} m² to 2×10^{-10} m², aumenta con una creciente porosidad, pero varía hasta dos órdenes de magnitud para porosidades similares. Considerando una conductividad de flujo = 1 S/m, la conductividad de mush va de 9×10^{-4} S/m to 1×10^{-1} S/m y aumenta exponencialmente con una creciente porosidad y una creciente conectividad de poro. Nuestros resultados revelan que los mushes ricos en cristales (cristalinidad = 0,70-0,85) permiten una migración de fundido y fluido eficiente a través de la corteza terrestre, a pesar de su baja porosidad relativa; en cambio, las esponjas cristalinas rígidas (cristalinidad = 0,85-0,95) optimizan la acumulación de fundido silicatado. En los gabros de St. Kitts, similitudes en la alta conductividad eléctrica de regiones anómalas capturadas por magnetotelúrica con las condiciones de mush simuladas experimentalmente sugieren que la acumulación de un bajo volumen relativo de fundido rico en volátiles dentro de un reservorio tipo mush rico en cristales pueden proveer señales suficientes para su reconocimiento geofísico.

Palabras Claves: Mush ricos en cristales, magmas máficos ricos en volátiles, gabros de hornblenda, St. Kitts.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto NERC FAMOS (From Arc Magmas to Ores) y por los fondos de movilidad de la Universidad de O'Higgins.

Agradecimientos: Se agradece a Kathy Cashman y Johan Lissenberg por sus fructíferos comentarios. A Ben Muse y Stuart Kearns por su ayuda con los instrumentos analíticos.

The influence of oxygen fugacity on melting phase relations of metabasaltic protoliths

Alexandre Corgne¹, Joaquín Catalán¹, Héctor Álvarez¹, Gaëlle Plissart¹, Julien Siebert²

(1) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

(2) Institut de Physique du Globe, Paris, France

Subduction zones are a major gateway in the solid-Earth global geochemical cycle, where oceanic lithosphere components are recycled within the mantle at the convergent margins of tectonic plates. The release of aqueous fluids from the dehydrating subducting lithosphere has been widely recognized as the main triggering mechanism for melting of the mantle wedge and subsequent arc magmatism. This textbook view of the origin of arc magmas has however been challenged in the last decade. There is an ongoing debate on whether, in addition to melting of the mantle wedge, slab crust melting is also contributing significantly to the geochemistry of arc magmas. Such a process has been normally reserved to explain the origin of magmatic rocks during Archean time, when the heat flux was much greater, and for modern "adakitic" arc magmas, which are linked to anomalous subduction settings. The question is whether slab melting is exclusive of these special cases or, on the contrary, a more widespread process that complements in variable amounts mantle wedge melting to generate most modern arc magmas. The viability of the latter is supported by thermal models of slab surface temperatures, pressure-temperature (P-T) estimates of exhumed eclogites, which partly exceed the wet basalt solidus, and by various petrogenetic models, which require melting of slab crust to explain some geochemical characteristics of arc magmas. In such a scenario, slab melting would occur at sub-arc depths of about 100 km, where serpentine and chlorite dehydration from the subducted lithospheric mantle release water required for hydrous melting of the overlying metabasaltic crust. Primitive arc magmas could thus represent hybrid melts formed by mixing slab and mantle wedge melts.

Using constraints from experimental petrology and geochemistry, this work aims at understanding better the hybrid melt model for arc magmatism. To constrain the composition of melts and residue during partial melting of slabs, we performed a series of high-pressure experiments on eclogite and garnet amphibolite protoliths. Of particular interest is the influence of oxygen fugacity given the current debate about redox conditions of the sources of arc magmas and within the subducted slab. Since dehydration of chlorite has recently been suggested to occur under unexpectedly reducing conditions compared to other dehydration reactions, slab melting could also take place under low redox conditions, thereby affecting the melting phase relations of slab mafic lithologies, partitioning of V between metabasalt minerals and slab melts and ultimately V concentration in primitive arc magmas. Although various experimental studies have focused on slab melting, only a few have been performed under relevant P-T conditions and none has actually studied systematically the influence of oxygen fugacity. To fill this gap in knowledge, partial melting experiments were thus performed in a piston-cylinder apparatus at IPGP at 1.8 and 3 GPa, between 700 and 900 °C and over a wide range of oxygen fugacity conditions (from FMQ+3 to FMQ-3) using as starting material a natural amphibolite with MORB-like composition and about 10% added water. At 3 GPa, run products consist of garnet, clinopyroxene, rutile, hydrous melt and sometimes silica (quartz or coesite), while at 1.8 GPa, run products also contain amphibole. Such mineral assemblages are characteristic of amphibole-free and amphibole-bearing eclogite. Geochemical analysis of the recovered samples are currently under way and will be presented at the conference to discuss the influence of oxygen fugacity, pressure and temperature or degree of melting on phase composition.

Keywords: oxygen fugacity, slab melting, oceanic crust, adakites, subduction zone.

Financing: Fondecyt Regular 1220502 "Vanadium partitioning between metabasalt minerals and hydrous melts during partial melting of subducted oceanic crust".

Evidencia de transpresión durante la formación de mineralización de óxidos de hierro-cobre-oro en Candelaria-Punta del Cobre – implicancias distritales y regionales

Irene del Real¹, Rick Allmendinger², Christian Creixell³, John F.H. Thompson⁴

(1) Universidad Austral, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Edificio Pugin, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Universidad de Cornell, Departamento de Ciencias Atmosféricas y de la Tierra, Ithaca, EEUU

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile

(4) PetraScience Consulting, Vancouver, Canada

Los depósitos tipo Óxidos de hierro-Cobre-Oro (IOCG) más jóvenes y mejor preservados en la Tierra actualmente corresponden a aquellos encontrados en la franja ferrífera costera de los Andes. La formación de los depósitos IOCG históricamente se ha atribuido a la extensión o transtensión en el trasarco asociado a la convergencia de alto ángulo en el margen Andino ocurrido durante el Jurásico Superior a Cretácico Inferior. En este trabajo documentamos deformación transpresiva sincrónica con la mineralización de Cu en el distrito IOCG Candelaria-Punta del Cobre, el distrito IOCG más grande y económicamente significativo de la franja Andina. La mineralización en el distrito Candelaria-Punta del cobre está hospedado en las rocas volcánicas a volcano-sedimentarias de la Formación Punta del Cobre del Cretácico inferior (135 Ma). Hacia el oeste del distrito, la Formación Punta del Cobre es intruida por el Batolito Copiapó, cuyos plutones principales son La Brea (118 Ma), San Gregorio (115 Ma) y Los Lirios (110 Ma).

A través de un mapeo estructural en superficie y en sondajes se determinó un sigma 1 de dirección noroeste-sudeste que es documentado por fallas sinestrales de orientación nor-noroeste que hospedan mineralización, diques noroeste y estructuras compresivas de orientación nor-noreste. El emplazamiento del plutón San Gregorio del Batolito Copiapó fue sincrónico con la mineralización, formando una zona de foliación de orientación nor-noreste paralelo al contacto del intrusivo y asociado a pliegues en la roca caja de cara hacia el contacto con el intrusivo. Una nueva edad U-Pb de la mineralización a través de dataciones de diques pre- y post-mineral lograron acotar el evento de Cu a los 115 Ma, la misma edad del plutón San Gregorio y la misma edad de los diques de orientación noroeste, constatando que el emplazamiento del intrusivo y la mineralización ocurrieron al mismo tiempo. Las edades obtenidas para la mineralización indican que la transpresión en el arco Cretácico ocurrió antes de lo que se ha documentado previamente, al menos a escala local, y que la mineralización tipo IOCG puede haberse facilitado por la transición de extensión a las fases iniciales de compresión que luego han caracterizado el arco y tras-arco Andino hasta el día de hoy.

Palabras Clave: IOCG, Candelaria, Transpresión.

Financiamiento: Este proyecto ha sido financiado por FONDECYT #3200532 y Lundin Mining.

Agradecimientos: Se agradece al staff de Candelaria y Lundin mining por su apoyo logístico en terreno y a la Universidad de British Columbia por el apoyo en los análisis U-Pb.

Understanding the genesis of gold-rich porphyry systems: A case of study from the Dorado porphyry gold project in the Maricunga belt, northern Chile

José Tomás Ovalle¹, Adam C. Simon¹, Michael Schirra², Zoltan Zajacz², Guillermo Peralta⁴, Magaly Antileo³, Francisco Alfaro⁵

(1) University of Michigan, Earth and Environmental Sciences, United States

(2) University of Geneva, Geneva, Switzerland

(3) Universidad de Chile, Geología, Santiago, Chile

(4) Rio Explorations SpA

(5) Consultor Independiente

Porphyry-type mineral deposits are the main source of copper and an important source of gold to our society. These deposits are characterized by highly variable metal endowment ranging from Cu-rich (i.e., high Cu/Au ratios) to Au-rich (i.e., low Cu/Au ratios) porphyries. Since the gold content in porphyry deposits is a key factor controlling their economic potential, a better understanding of the processes leading some porphyry deposits to become gold-rich and copper-poor is critical, and to date remains poorly understood. Potentially influencing factors to be tested include the chemical composition, depth of emplacement and redox conditions of the causative magmas.

We are investigating the cause for the variability of the Cu/Au ratios among porphyry deposits by working on samples from the Maricunga belt in northern Chile. This belt of Miocene age hosts numerous porphyry-type systems characterized by a lack of mineable copper and Cu/Au ratios that are among the lowest for porphyry deposits globally.

Here, we present the first results of an in-depth study that focuses on the genesis of the Dorado porphyry gold project which is a typical Maricunga-type porphyry gold system associated with intermediate subvolcanic intrusive centers, gold mineralization hosted in banded quartz veinlets, and chlorite-magnetite-albite hydrothermal alteration. In particular, our study aims at reconstructing the geochemical evolution of ore metals (Au, Cu, Ag, etc.) and volatile components (S, Cl) from the magma source to the overlying magmatic-hydrothermal system by analyzing the composition of silicate melt inclusions (SMI) in the subvolcanic rocks and fluid inclusions (FI) in the gold-bearing quartz veins using the Laser Ablation ICP-MS method.

Our results reveal anomalously high concentrations of Au and relatively normal concentrations of Cu for both SMI and FI from the Dorado porphyry system. The measured Au concentrations in SMI and FI from this deposit are one to two orders of magnitude higher than those reported for typical arc magmas and mineralizing fluids in porphyry Cu-Au deposits, respectively. Whereas, Cu contents in SMI and FI show no significant enrichment spanning a range typical for arc magmas including fertile and barren suites.

Preliminary interpretations suggest that magmas associated with the Dorado porphyry system were characterized by a gold-endowed geochemical signature, which may be indicative of a high fertility potential to form porphyry gold deposits. Our data: *i)* provide the first direct constraints on the ore metal and volatile abundances in magmas associated with a porphyry-type system in the Andean volcanic arc; *ii)* shed lights on the potential role of the original metal content in magmas as a key parameter for the generation of porphyry gold deposits, and *iii)* highlight the use of the SMI technique as a potentially promising exploration tool for porphyry systems elsewhere.

Keywords: Porphyry deposits, silicate melt inclusions, ore metals, volatiles, ore fertility.

Financing: This research project is funded by the National Science Foundation (NSF) through the EAR-Petrology and Geochemistry program (Grant #2214119) entitled "Reconstructing the magmatic and hydrothermal evolution of the Au-rich, Cu-poor Dorado porphyry deposit, Chile: Implications for Cu/Au ratios in porphyry deposits worldwide"

Acknowledgements: Authors acknowledge Rio Explorations SpA and Angold Resources.

Inclusiones vítreas y fluidas en el yacimiento Chuquicamata: proxys para la comprensión de las etapas tempranas de formación del sistema mineralizado

Isaac Rodríguez Cárceles¹, Jorge Morales-Leal¹, Eduardo Campos Sepúlveda¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Los depósitos tipo pórfido cuprífero son la principal fuente de cobre del mundo. Décadas de estudios no dejan lugar a dudas respecto de su origen magmático – hidrotermal. La evidencia indica que los metales, los fluidos y otros componentes necesarios para la formación de estos depósitos son aportados desde una fuente magmática, mientras que el proceso mineralizador está relacionado con actividad hidrotermal (Audétat y Simon, 2012; Chambefort et al., 2008; Cline y Bodnar, 1991; Hedenquist y Lowenstern, 1994; Sillitoe, 2010). En este contexto, el análisis de inclusiones vítreas e inclusiones fluidas tardimagmáticas representan una ventana de observación que permite determinar características físicas y químicas del fundido parental y de los fluidos tardimagmáticos responsables de la formación de estos depósitos (e.g. Campos et al., 2001; Campos et al., 2006; Harris et al., 2003; Halter et al., 2005; Klemm et al., 2007; Mernagh et al., 2020; Riveros et al., 2021; Rusk et al., 2004; Rusk et al., 2008; Stefanova et al., 2014; Ulrich et al., 2002).

El depósito tipo pórfido cuprífero Chuquicamata corresponde a una anomalía geoquímica de clase mundial. A pesar de su relevancia, sólo una tesis de pregrado ha intentado caracterizar las inclusiones fluidas del yacimiento (Vega, 1989), lo que deja de lado información relevante sobre la génesis de este depósito. El estudio sistemático de inclusiones vítreas y fluidas tempranas entregaría nuevos antecedentes sobre las condiciones fisicoquímicas que posibilitan la formación de este pórfido cuprífero. Para ello, se han seleccionado muestras de la zona de alteración potásica provenientes desde el fondo del rajo y de labores subterráneas, lo que representa una columna mineralizada de aproximadamente 500 m. El estudio se centrará en el análisis de inclusiones vítreas y fluidas contenidas en fenocristales de cuarzo, cristales de circones y apatitos, así como también inclusiones fluidas hospedadas en vetillas de cuarzo asociadas a alteración potásica (vetas tipo A y B). Observaciones preliminares evidencian la existencia de inclusiones fluidas de tamaño pequeño (< 15 µm), principalmente bifásicas (tipo L-V), y trifásicas (L-V-opaco), estas últimas muy escasas. Con el objetivo de estudiar inclusiones vítreas en circones y apatitos, en algunas muestras se realizará una separación de minerales por densidad.

Mediante la utilización de una platina calentadora / enfriadora Linkam THMS 600 se determinará la temperatura de homogeneización y la salinidad en % wt. NaCl equivalente de las inclusiones fluidas, mientras que para el estudio de inclusiones vítreas y fluidas con temperaturas de homogeneización mayores a 600°C se utilizará una platina Linkam TS1500 disponible en la Universidad de Ginebra, Suiza. De manera complementaria, se espera obtener la composición química de las inclusiones mediante la técnica de LA-ICP-MS (disponible en la Universidad de Ginebra).

Con lo anterior, se espera determinar la temperatura y composición del fundido parental al momento de la exsolución de fluidos, así como la temperatura y química de las soluciones hidrotermales tempranas. Se espera que los datos obtenidos permitan una mayor comprensión de las características físicas y químicas de los fluidos al momento de la exsolución de volátiles desde el magma parental.

Palabras Clave: Pórfidos cupríferos, Chuquicamata, Fluidos magmáticos, Inclusiones fluidas, Inclusiones vítreas.

Ore-metals enrichment in hydrothermal fluids revealed by helium isotopes composition of volcanic fumaroles

Daniele Tardani¹, Pablo Sánchez-Alfaro², Santiago Tassara¹, Pamela Pérez-Flores⁵, Philippe Robidoux³, Claudio Contreras Hidalgo¹, Daniele Pinti⁴, Martin Reich³

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Université du Québec à Montréal, Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Montreal, Canada

(5) Consultoría e Investigación Geológico Ambiental Ltda, Huasco, Chile

Copper is a critical element increasingly demanded in modern society due to wide application in industry and in green energy technologies (Schipper et al., 2018). Background Cu concentrations are less than 30 ppm in the Earth's crust (Rudnik and Gao, 2003), so economical extraction is only viable in magmatic-related ore deposits, representing the main geochemical anomalies of Cu, Mo, Au, Fe, and other critical elements. Subduction zones are key places on Earth where some of the largest ore deposits of Cu, Mo, and Au form. Arc magmas are generated by melting of the sub-arc mantle triggered by the influence of slab-derived fluids, providing sulfur and water, and generating more oxidized magmas than in other tectonic settings. Upon ascent, differentiation, and cooling, arc magmas exsolve hydrothermal fluids that may efficiently collect, transport, and deposit metals to form ore deposits. However, the reasons why some magmas can generate large-scale ore deposits while others remain unproductive remain unclear. Although much work has been done on the magmatic controls on ore-formation as well as in the optimal conditions of mineralizing fluids by studying fluid inclusions and structural conditions of hydrothermal ore deposits, less focus has been put into the active hydrothermal systems. Here, we examine active hydrothermal systems from the Andes of Southern Chile to explore the potential interplays between structural features and ore fertility. We analyze the fluid source using helium isotopes and the ore fertility assessing the abundances of some key base metals and ligands in hydrothermal fluids. The hydrothermal systems where there are favorable pathways to the surface display more primitive helium isotopes signatures ($R/R_a > 7$) and lower base metal contents. By contrast, hydrothermal systems located where the structural domains are misoriented with respect to the regional stress field, display more crustal-like helium ratios ($R/R_a < 5$) and higher concentrations of base metals. Here we present the first direct observation on how the structural context affect the transport of base metals and ligands in active hydrothermal environments.

Keywords: SVZ, Metals, Helium isotopes.

Financing: Fondecyt Iniciación 11220777.

The flux of gold across the lithosphere: from the mantle to epithermal deposits

Santiago Tassara¹, Alan D. Rooney², Jay J. Ague², Diego Guido³, Martin Reich⁴, Fernando Barra⁴, César Navarrete⁵

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería

(2) Yale University, Department of Earth and Planetary Sciences

(3) Universidad Nacional de La Plata, Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

(5) Universidad de la Patagonia San Juan Bosco, Departamento de Geología

The formation of epithermal Au-Ag deposits is intimately bound to the highly efficient processes of hydrothermal circulation and ore precipitation in the shallow crust. However, whether the precious metals and volatiles required to form these deposits originate from a distinctively enriched mantle or crustal source remains controversial. Here we explore this question by focusing on the source of gold in the Deseado Massif Auriferous Province in southern Patagonia, Argentina. The DMAP, totalizing approximately 28.2 Moz in Au equivalent, hosts over 50 sites mineralized with Jurassic Au-Ag low sulphidation epithermal deposits. An exceptional benefit of this region for investigating the connection between metals and their origins lies in the existence of peridotite xenoliths, which have been transported to the surface through Neogene volcanic activity, providing invaluable insights into the underlying subcontinental lithospheric mantle (SCLM). Previous work provided evidence that these xenoliths record the archive of Au-rich metasomatic agents that may have been responsible for producing Au enrichment in specific SCLM domains beneath the DMAP (Tassara et al., 2017). To investigate whether these reservoirs could have served as the metal source for the DMAP, we conducted Os isotope analyses on pyrite grains extracted from the Cerro Vanguardia deposit, the largest known ore system within the DMAP. Our results yield an isochron age of 147.4 ± 2.9 Ma (MSWD = 1.04), consistent with previous Ar-Ar dating, and an initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio (Osi) of 0.26 [Tassara et al., 2022]. The obtained Osi value can only be attributed to a considerable contribution from the mantle to the overall metal budget of Cerro Vanguardia. These findings offer a key geochemical connection between previous evidence for Au enrichment in the SCLM and the formation of an epithermal Au province in the overlying upper crust. This study supports the hypothesis that Au-rich crustal domains ultimately form by ore fluids that extract precious metals from magmas (or volcanic rocks) produced by partial melting of fertile SCLM reservoirs.

Keywords: gold, epithermal, mantle, osmium isotopes.

References:

- Tassara, S., et al. (2017) Plume-subduction interaction forms large auriferous provinces. *Nature Communications* 8, 843.
- Tassara, S., et al. (2022) Osmium isotopes fingerprint mantle controls on the genesis of an epithermal gold province. *Geology* 50, 1291–1295.

Geoquímica de elementos traza en sulfuros del depósito estratoligado de Cu-(Ag) de El Soldado, Chile

Camila Alcoholado Maillard¹, Martin Reich¹, Fernando Barra¹, Rurik Romero¹, Gelu Costin²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) Rice University, Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Houston, Texas, USA

Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag), también llamados de “tipo manto”, representan actualmente la tercera fuente más importante de cobre en Chile, antecidos por los depósitos de tipo pórfido de Cu e IOCG. Éstos se encuentran distribuidos en una franja de más de 1.000 km a lo largo de la Cordillera de la Costa de la zona centro y norte de Chile, pudiéndose dividir en dos grandes sub-franjas. La primera, de edad Jurásico Superior, se distribuye entre Tocopilla y Taltal, donde la mineralización se encuentra hospedada principalmente en secuencias volcánicas, mientras que la segunda sub-franja, de edad Cretácico Inferior, se ubica entre Taltal y Santiago, caracterizándose por una mineralización hospedada en secuencias volcano-sedimentarias con presencia de bitumen [1].

Es en este contexto que se enmarca el presente estudio, centrado en el yacimiento estratoligado de Cu-(Ag) de El Soldado, de edad Cretácico Inferior y el más relevante de su tipo en Chile, ubicado en la comuna de Nogales, región de Valparaíso. Estudios petrográficos anteriores indican la presencia de dos principales asociaciones paragenéticas: una primera asociación de pre-mena caracterizada por la presencia de pirita estrechamente relacionada a materia orgánica, en forma de bitumen, y una segunda asociación de mena caracterizada por la presencia de calcopirita, bornita y digenita, las cuales se encuentran reemplazando a las fases de la etapa de pre-mena. Estudios previos [2-4] han propuesto una estrecha relación entre la presencia de materia orgánica, con metales de interés económico, planteando un modelo genético para estos depósitos que involucran aportes de metales y ligantes, tanto desde fuentes magmático-hidrotermales como sedimentarias. Sin embargo, aún no se ha estudiado en detalle la geoquímica de elementos traza en pirita y los sulfuros de Cu-(Fe) en el depósito, la cual puede aportar antecedentes adicionales respecto de la fuente de los metales, los fluidos mineralizadores y los procesos post-cristalización de la mena.

Observaciones petrográficas y texturales en muestras de El Soldado se condicen con lo descrito previamente en la literatura, reconociéndose procesos de reemplazo de las asociaciones de pre-mena (pirita-bitumen) por asociaciones sulfuradas de mena (calcopirita-bornita-calcosina), indicando así un progresivo aumento en el contenido de cobre presente en la mineralización del depósito. Por otra parte, el bitumen se encuentra comúnmente relacionado con pirita de la etapa de pre-mena, y presenta evidencias texturales de procesos de enfriamiento, fracturamiento y desgasificación. El análisis geoquímico de elementos mayores, menores y traza, tanto en sulfuros como bitumen en ambas asociaciones paragenéticas se realizaron mediante una combinación de técnicas microanalíticas, entre las que se incluyen microsonda electrónica (EMPA) y espectrometría de masas por plasma inductivamente acoplado y ablación láser (LA-ICP-MS).

Los resultados de los análisis indican una importante concentración de elementos traza en los sulfuros presentes en El Soldado, en concentraciones que fluctúan entre decenas a miles de ppm, y en ocasiones a niveles de wt%. En particular, la pirita en la asociación de pre-mena se caracteriza por presentar concentraciones significativas de As ($\leq 1,93$ wt%), Mn (≤ 3.090 ppm), y Au (≤ 1.195 ppm). Por otra parte, la calcopirita asociada a la asociación de mena hospeda concentraciones importantes de Au (≤ 1.184 ppm), Ag (≤ 986 ppm), Mn (≤ 2.540 ppm), Zn (≤ 2.066 ppm) y Se (≤ 2.800 ppm), mientras que la bornita en la misma asociación paragenética es huésped importante de Ag (≤ 1.659 ppm), Mn (≤ 1.600 ppm), Zn (≤ 1.905 ppm), Bi (≤ 530 ppm) y Pb (≤ 2.342 ppm). Finalmente, los valores de EMPA en bitumen indican altas concentraciones de metales (Mn, Cu, Ca, Ag), las cuales oscilan entre las decenas y centenas de ppm, mientras que las concentraciones de Fe y S superan las 1.000 ppm.

Los resultados obtenidos apuntan a una importante concentración de elementos traza en las fases sulfuradas, algunos de los cuales (ej. Mn, Ag, Co, Ni) sugieren un posible rol y aporte desde fuentes orgánicas y/o sedimentarias. El análisis de concentraciones y razones elementales en pirita y sulfuros de Cu permite obtener información geoquímica a escala microanalítica, lo que es de gran relevancia tanto para la conceptualización de modelos genéticos, así como también para la evaluación del contenido de elementos estratégicos o críticos en el depósito, y la exploración de nuevos recursos minerales en el distrito minero.

Palabras Clave: Geoquímica, Elementos traza, Sulfuros, Estratoligados de Cu-(Ag), El Soldado.

Financiamiento: La primera autora agradece a la Society of Economic Geologists (SEG) por proveer financiamiento a través de la beca “Graduate Student Fellowship (GSF)”. Adicionalmente, se agrade a ANID por otorgar apoyo a esta investigación a través de la “Beca de Magíster Nacional ANID, Año Académico 2023” N°22230553, y del proyecto FONDECYT Regular #1230161.

Referencias:

- [1] MaksaeV y Zentilli (2002) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective 2, 185-205.
- [2] Zentilli et al. (1997) International Geology Review 39, 1-21.
- [3] Boric et al. (2002) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective 2, 163-184. [4] Herazo et al. (2021) ACS Earth and Space Chemistry 5, 566-579.

Evolución y fertilidad de magmas en el distrito El Algarrobo, norte de Chile: señales diagnósticas en circones asociados a depósitos de tipo hierro-apatito

Andrés Ojeda¹⁻², **Fernando Barra**¹⁻², Martin Reich¹⁻², Rurik Romero¹⁻², María José Tapia¹⁻²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Los depósitos de hierro-apatito, también llamados tipo Kiruna o del inglés Iron Oxide–Apatite (IOA), son una importante fuente de hierro en el mundo. La Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa del norte de Chile alberga numerosos depósitos de hierro-apatito que están espacialmente relacionados con intrusivos de composición intermedia de edad Jurásica Tardía a Cretácica Temprana. Esta relación espacial sugiere una conexión genética entre la actividad magmática y la mineralización de magnetita-apatito. Sin embargo, las características químicas de estos intrusivos han sido poco estudiadas. En este trabajo se reportan las características geoquímicas de los intrusivos de distintas unidades plutónicas en el distrito El Algarrobo y alrededores, algunas de las cuales están espacialmente relacionadas con depósitos tipo IOA, y otras a sistemas más afines a pórfidos cupríferos. El objetivo principal es comprender las condiciones magmáticas asociadas a estos depósitos e identificar posibles indicadores de fertilidad que sean útiles para comprender la génesis de los depósitos IOA, y discriminar sus señales geoquímicas para fines de exploración. Para lograr este objetivo, se utilizó la petrocronología de circones, que combina dataciones U–Pb con la determinación de la concentración de elementos trazas mediante la técnica de ablación láser acoplada a un ICP-MS.

Los resultados de este estudio muestran que, durante el periodo asociado a la formación de depósitos tipo IOA (~136–123 Ma), los intrusivos se caracterizan por ser relativamente reducidos ($\Delta\text{FMQ} < +1$, incluso < 0) y tener un contenido bajo de agua ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.3$). Estas características podrían ser la causa de la escasa presencia de sulfuros en estos depósitos, al ser condiciones magmáticas menos propicias para la solubilización de azufre. Por otro lado, en el periodo posterior (~123–95 Ma), más afín a la formación de pórfidos cupríferos, se observa un marcado aumento del contenido de agua ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.7$) y en la fugacidad de oxígeno ($\Delta\text{FMQ} < +2,2$) de los intrusivos, lo que se traduce eventualmente en altos contenidos de azufre disponible para una transferencia a fases volátiles en etapas tardías del magmatismo. Este cambio en las condiciones magmáticas sería reflejo de un cambio en la configuración tectónica desde un ambiente extensional a uno compresivo, lo que conlleva a mayores tiempos de residencia de magmas en zonas profundas de la corteza y por ende un aumento en los contenidos de H_2O debido a la recarga de nuevos flujos de magmas.

En base a lo anterior, se proponen por primera vez, indicadores de fertilidad magmática en circones para yacimientos IOA andinos. Estos indicadores apuntan a intrusivos no saturados en agua y relativamente reducidos, con una razón ($\text{Eu}/\text{Eu}^*/(\text{Dy}/\text{Yb}) < 3$ y condiciones redox de $\Delta\text{FMQ} < +1$ (incluso < 0). Los resultados obtenidos indican que los magmas asociados a depósitos IOA presentarían condiciones redox anómalamente reducidas para ambientes de arco ($\Delta\text{FMQ} < 0$), y cuyas causas deben ser exploradas en profundidad.

Estos hallazgos ofrecen una base para futuras investigaciones, planteando nuevas interrogantes sobre la génesis de estos depósitos y ofreciendo posibles indicadores geoquímicos diagnósticos de fertilidad de intrusivos generadores de mineralización de hierro que deben ser probados en otros distritos IOA andinos y en otras partes del mundo, para evaluar su efectividad como herramienta de discriminación y exploración.

Palabras Clave: Depósitos de hierro-apatito, Distrito El Algarrobo, Petrocronología U–Pb, Magmatismo Jurásico–Cretácico, Fertilidad metalogénica

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el proyecto ANID-FONDECYT #1190105 “Source and Metal Fertility of Magmas from the Early Jurassic to Late Cretaceous Continental Magmatic Arc, Coastal Cordillera of Northern Chile (26° to 30°S)” adjudicado por F.B. y el “Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción” NC130065 perteneciente a la Iniciativa Científica Milenio (ICM). El trabajo analítico en LA-ICP-MS es financiado por la beca de instrumentación ANID-FONDEQUIP EQM120098.

Agradecimientos: Agradecemos a Makarina Orellana y a la Compañía Minera del Pacífico (CMP) por facilitarnos el acceso a la mina El Algarrobo.

La Higuera deposit: Evidence for the transition between IOA and IOCG mineralization styles

Fernando Barra¹, Ricardo Fuentealba¹, Martin Reich¹, Gisella Palma², Adam C. Simon³

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

(3) University of Michigan, Earth and Environmental Sciences, Ann Arbor, Michigan, USA

The IOCG (iron oxide-copper-gold) clan encompasses several styles of mineralization characterized by the presence of iron oxides, primarily magnetite and hematite, as significant mineral phases. Within this clan, the end-members are the iron oxide-apatite (IOA) deposits and the IOCG deposits. IOA deposits, also known as "Kiruna-type" deposits, typically exhibit tabular, irregular, massive bodies of magnetite with actinolite, minor apatite, and sulfides. On the other hand, IOCG deposits are structurally controlled and commonly occur in permeable rock units. These deposits are characterized by abundant magnetite and/or hematite with Cu sulfides including chalcopyrite and lesser amounts of bornite. IOCG deposits can also contain gold and other commodities like rare earth elements (REE), uranium (U), and cobalt (Co).

The Coastal Cordillera of northern Chile is considered one of the largest IOA–IOCG metallogenic provinces, hosting several IOA and IOCG deposits of varying sizes. These deposits are emplaced along or spatially associated with the Atacama Fault System (AFS). The mineral deposits within this belt are predominantly hosted in volcanic and volcanoclastic rocks of Jurassic and Cretaceous age, although a few deposits are found in stocks with intermediate to mafic compositions.

In this study, we present novel insights into the formation of IOCG deposits and their potential transition to IOA mineralization style at depth, utilizing a combination of field observations, petrographic and textural analyses, geochronology, and mineral chemistry analysis of magnetite, actinolite, and pyrite using EMPA and LA-ICP-MS techniques. Our research is centered on the La Higuera IOCG vein-type deposit, which is hosted in the La Higuera stock.

The La Higuera deposit is characterized by a series of mineralized veins consisting of magnetite, actinolite, pyrite, and chalcopyrite, accompanied by minor phases such as apatite, quartz, hematite, calcite, and epidote. These veins exhibit two primary orientations, namely N80°W and N60°E, with a dip ranging from 55° to 80° towards the south. The thickness of the veins varies from a few centimeters to as much as 8 m.

The Cu-Fe veins in the La Higuera deposit exhibit a distinct hydrothermal alteration halo. This alteration is manifested by the selective replacement of mafic minerals by actinolite in close proximity to the veins, which transitions outward to an actinolite-albite assemblage. In some veins, there is evidence of quartz-sericite and K-feldspar-biotite alteration, often accompanied by actinolite. These alteration zones grade outward to an albite-chlorite±actinolite mineral assemblage.

The veins in the La Higuera deposit predominantly consist of massive magnetite, often exhibiting intergrowth with large actinolite crystals reaching sizes of up to 5 cm. They also contain variable amounts of sulfide minerals (pyrite, chalcopyrite). Magnetite shows different textures including lamellae exsolutions of ilmenite or spinel, oscillatory zoning, inclusion-rich and inclusion-poor types. Pyrite is the dominant sulfide mineral and shows variable concentrations of Co and Ni.

Field and mineralogical observations revealed that the mineralized veins at La Higuera exhibit mineral associations consistent with both IOCG and IOA deposits. The coexistence of mineral assemblages typically associated with IOCG deposits (such as magnetite, hematite, sulfides, and Cu oxides) and IOA deposits (including magnetite, actinolite, and minor apatite) indicates a transition between these two deposit types. This transition is significant as it provides insights into the evolution and ore-forming processes involved in the formation of IOCG and IOA deposits. Furthermore, it also supports the proposed "flotation model" for the formation of IOA deposits in the Andean Cordillera.

Keywords: IOA, IOCG, Química Mineral, Magnetita, La Higuera.

Imágenes LA-ICPMS en pirita como herramienta de exploración, un caso de dos sistemas magmático-hidrotermales sobre impuestos

Fernanda Castro Dragosevic¹, Álvaro Muñoz Muñoz², José Miguel López Núñez²

(1) Geológica servicios SPA, Vale Exploraciones Chile, Santiago, Chile

(2) Vale Exploraciones Chile, Santiago, Chile

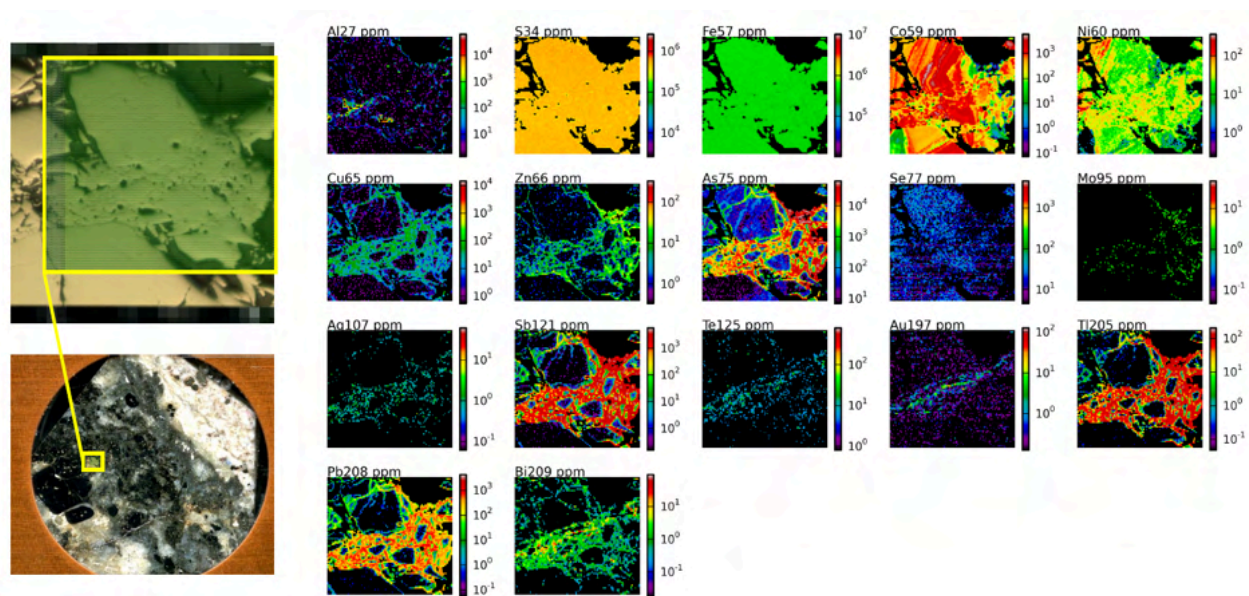
A lo largo de las últimas décadas se han empleado técnicas de geoquímica mineral como herramienta para el reconocimiento de las características fisicoquímicas de los fluidos formadores de estos minerales, cuya ocurrencia se puede relacionar con diversos sistemas mineralizados y el mapeo de elementos traza por LA-ICP-MS ha demostrado ser una técnica cualitativa extremadamente valiosa para proporcionar visualización de distribuciones de oligoelementos dentro de minerales individuales o conjuntos. En este estudio se aplica la técnica de imágenes o mapas LA-ICPMS en piritas para un contexto exploratorio, en torno a uno de los proyectos de Vale, donde el objetivo principal es determinar el o los tipos de depósito al que se asocian los eventos de alteración y mineralización que son reconocidos en el proyecto. Este proyecto es realizado en distintas fases. La primera de ellas consiste en una caracterización petrogenética macroscópica, donde se caracterizan las distintas litologías, alteraciones y ocurrencias de mineralización, especialmente se busca reconocer los eventos hidrotermales expuestos en casi 1700 metros de sondajes. Posteriormente se realiza la caracterización microscópica, la que se utiliza para diferenciar de una mejor manera las distintas ocurrencias de pirita y sus características texturales y las distintas relaciones paragenéticas con otros minerales. Finalmente se emplea espectroscopía de reflectancia, para diferenciar minerales, especialmente arcillas y minerales de baja dureza. Todo esto resulta en la definición de una secuencia paragenética que incluye tres eventos, para los cuales con esta técnica no se puede establecer su temporalidad, y estos eventos corresponden a calco sódico - propilítico de alta temperatura, hidrolítico y de brechas hidrotermales. Al emplear la técnica de imágenes LA-ICPMS agrega un cuarto evento, determinado como evento de calcita blanda y además debido a las texturas minerales de pirita que se reconocen mediante concentraciones de elementos como Co, Ni y As en los mapas, es posible establecer un orden temporal a cada uno de los cuatro eventos mencionados. Mediante esta técnica también es posible reconocer que los eventos no corresponden al mismo sistema magmático-hidrotermal, sino que se desarrolla la posibilidad de la superposición de dos sistemas, los que se diferencian en la proveniencia de sus fluidos, ya que uno de ellos es únicamente proveniente de una fuente magmático hidrotermal, mientras que el otro presenta evidencias de mezcla con fluidos provenientes de salmueras externas.

El primer sistema determinado es representado mediante el evento paragenético definido como calco sódico o propilítico de alta temperatura. Es representado por una paragénesis mineral compuesta por magnetita, pirita, epidota, clorita, carbonatos $\pm$ hematita, rutilo, pirrotina, calcopirita, marcasita, actinolita, ferrosaponita, estilpnomelano, beidellita, montmorillonita y cuarzo. Si bien esta paragénesis mineral no incluye minerales de alta temperatura característicos, como apatito o escapolita, se propone que la señal observada es probablemente el reflejo de una zona calco sódica más bien distal del núcleo. Además existen antecedentes que permiten un acercamiento con la hipótesis de fuente de IOCG, donde se expone que en el límite norte del blanco Incahuasi se encuentra el sector de Nueve Vidas, el cual presenta alteración de clorita $\pm$ epidota $\pm$ escapolita, sectores de stockwork de magnetita y brechas ricas en apatito. También identifican zonas masivas con reemplazo a escapolita, vetas de anfíbola y granate masivo. Por otro lado, los reportes internos de Vale evidencian altas concentraciones de P tanto al norte de la quebrada Incahuasi como al oeste del complejo intrusivo Santa Ana, donde también se identifican altas concentraciones de Fe y bajas de S, lo que junto con las altas concentraciones de P describe una probable presencia de importantes volúmenes de magnetita y apatito, lo que refuerza la teoría de una zona calco sódica distal, probablemente en sus últimas fases. A través del análisis LA-ICP-MS se obtienen resultados para concentraciones de Co que promedian valores de 430 ppm, Ni 230 ppm y As 700 ppm. Estos valores se encuentran bajo los promedios aproximados que han sido sugeridos para depósitos de IOCG, sin embargo, estos rangos de concentraciones establecidos son caracterizados en base a importantes yacimientos económicos y como no existe la certeza de que los fluidos caracterizados en este proyecto representan fuentes de sistemas estériles, es probable que estos rangos no tengan una real aplicabilidad en el proyecto. Además, de acuerdo con las razones Co/Ni, esta metodología refleja la interacción entre un fluido de origen magmático - hidrotermal, probablemente asociado con la unidad intrusiva Monzodioritas de Sierra Santa Ana, de aproximadamente 46 Ma y una salmuera externa, posiblemente asociada con la deshidratación de la cuenca marina Jurásica Tarapacá. Debido a la información expuesta, se define que el evento es calco sódico, caracterizando la zona distal de un sistema de IOCG de fuente magmático-hidrotermal con mezcla de fluidos probablemente provenientes de salmueras de deshidratación de sedimentos jurásicos marinos. Sillitoe et al. (2020) reconocen en Bulgaria el depósito IOCG más joven del mundo hasta el momento, datado en $80,6 \pm 0,4$ Ma. De acuerdo con los antecedentes y discusiones desarrolladas, existe una implicancia metalogenética, pues la alteración y mineralización tipo IOCG descrita en este trabajo posiblemente se asocia con una edad de magmatismo de 46 Ma, por lo que representaría uno de los sistemas IOCG más jóvenes reconocidos en el mundo.

Se genera la superposición de un segundo sistema representado por el evento paragenético hidrolítico y el posterior evento de brechas hidrotermales. El evento hidrolítico es caracterizado por una paragénesis mineral de pirita, carbonatos, arcillas $\pm$ cuarzo, óxidos de Fe, caolinita, yeso, dickita, pirofilita, hematita, rutilo y trazas de calcopirita, marcasita, bornita e hidróxidos de Fe. Respecto a los resultados de LA-ICP-MS, el evento presenta resultados de concentraciones promedio de 400 ppm de Co, 27 ppm de Ni y 44 ppm de As, lo que indica que, si bien ambos eventos mencionados presentan valores similares de Co, se diferencian fuertemente debido al empobrecimiento de Ni y As en el evento hidrolítico. Las concentraciones de Co aparentemente coinciden con valores esperables establecidos para un sistema de pórfido. Además, debido al análisis de concentraciones elementales es posible comprobar que los dos eventos mencionados efectivamente no pueden corresponder al mismo sistema. Por otro lado, el evento de brechas hidrotermales es de tipo fluidizadas de morfología en dique con matriz de turmalina, cuarzo microcristalino y arcillas. Este evento exhibe concentraciones promedio de Co, Ni y As de 15, 220 y 2.640 ppm, lo que describe una naturaleza de fluidos de baja temperatura, semejante a aquellos que forman sistemas epitermales, lo que coincide con la asociación de este evento con un escape explosivo de volátiles por la ruptura del caparazón del cuerpo intrusivo.

Los eventos mencionados representan un origen únicamente magmático - hidrotermal debido a sus razones Co/Ni, las que indican una fuente únicamente de tipo magmático-hidrotermal. Respecto al cuerpo intrusivo que desarrolla el sistema tipo pórfido, es posible que corresponda con la unidad Pórfidos Andesíticos de Sierra Santa Ana (Cornejo y Mpodozis, 1996), tanto por su cercanía espacial como por su edad, la que no se sabe con exactitud, sin embargo, los eventos de pórfido son posteriores al evento de IOCG, el que posiblemente tiene edades aproximadas de 46 Ma, por lo que el sistema de pórfido debe ser más joven. La edad de la unidad Pórfidos Andesíticos de Sierra Santa Ana ha sido acotada como menor que las edades de principios del Eoceno, gracias a las unidades a las que intruye (Cornejo y Mpodozis, 1996). Además, en la carta geológica de Sierra Vaquillas Altas (Venegas et al., 2013) es reconocida una unidad espacialmente cercana, con una descripción petrográfica muy similar y datada en $41,36 \pm 0,5$ Ma denominada como Intrusivos de Sierra Santa Ana, miembro c. Las unidades no presentan el mismo nombre probablemente porque las dos cartas (Exploradora y Sierra Vaquillas Altas) no se encuentran homologadas.

Finalmente se emplaza un evento de tipo epitermal tardío caracterizado por la presencia de vetillas rellenas por calcita con textura bladed, cuarzo plumoso, carbonatos, calcedonia y mena de pirita. Las concentraciones de Co, Ni y As para este evento son respectivamente de 238 ppm, 158 ppm y 2.497 ppm, presentando un claro enriquecimiento de As y empobrecimiento de Co y Ni, la cual es una configuración comúnmente asociada con ambientes epitermales. En base a la razón Co/Ni, es posible asociar el evento con fluidos magmático - hidrotermales asociados al pórfido, al igual que los eventos hidrolíticos y de brechas hidrotermales, pero con mezcla de fluidos externos. Esta mezcla presenta un pH reducido y casi neutro debido a la amortiguación de la roca huésped, baja salinidad y un componente de aguas meteóricas más elevado, generando un carácter epitermal de alta sulfuración.



Fotografía de una de las muestras de roca que representan en evento epitermal de calcita bladed con su respectiva ocurrencia de pirita y sus imágenes LA-ICPMS donde se observa la formación inicial del grano representando un evento de alto Co y Ni y empobrecido en As. Se reconoce un segundo evento rico en As que brechiza del grano, evidenciando la sobreimpresión de dos fluidos que cristalizan el grano de pirita.

Como proyección de esta técnica para la exploración de sistemas mineralizados se considera que la técnica de mapas LA-ICPMS puede ser una herramienta muy valiosa, que nos permite reconocer algunas variables fisicoquímicas de los fluidos formadores de la mineralización, por ejemplo, es posible comparar la temperatura de formación entre minerales distantes del mismo evento y ayudar a vectorizar hacia la zona de mayor temperatura, hacia donde se pudiese encontrar el núcleo. Otra aplicación es por ejemplo la separación de sistemas minerales, como es el caso de este estudio, donde se puede definir la existencia de dos sistemas mineralizados superpuestos, lo que se considera información valiosa tanto para la exploración como para el eventual modelamiento de un sistema.

Palabras Clave: geoquímica mineral, Exploración, Imágenes LA-ICPMS, Sobreimpresión de sistemas.

Financiamiento: Vale.

Origen de la mineralización de magnetita en el Complejo Volcánico Laguna del Maule, Chile: ¿Un nuevo ejemplo de depósito tipo óxido de hierro-apatita en los Andes?

Ernesto Cofré¹, Martin Reich¹⁻², José Tomás Ovalle¹⁻²⁻⁵, Gisella Palma¹⁻³, Fernando Barra¹⁻², Artur Deditius⁴, Adam Simon⁵, Malcolm Roberts⁶, Brian Jicha⁷

- (1) Departamento de Geología y Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile
 (3) Escuela de Geología, Universidad Mayor, Santiago, Chile
 (4) School of Mathematics, Statistics, Chemistry and Physics, Murdoch University, Murdoch, Australia
 (5) Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan
 (6) Centre for Microscopy, Characterization and Analysis, The University of Western Australia, Perth, Australia
 (7) Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin

Los depósitos de óxido de hierro-apatita o IOA (del inglés iron oxide-apatite), también conocidos como depósitos de magnetita-apatita o tipo Kiruna, son una fuente importante de hierro y potencialmente de elementos críticos como tierras raras, vanadio, uranio, torio y cobalto. A la fecha, el representante más joven de este tipo de mineralización a nivel mundial corresponde al depósito El Lago de edad Pleistoceno (~2 Ma), un caso aparentemente único debido a sus características volcánicas y su ocurrencia en la región Altiplano-Puna de los Andes Centrales. Sin embargo, existe evidencia de mineralización de tipo IOA asociada a actividad volcánica similarmente joven en los Andes Centrales, la cual no se encuentra debidamente caracterizada y estudiada.

En esta investigación reportamos la existencia de una mineralización de tipo IOA de edad menor a 1 Ma hospedada dentro del Complejo Volcánico Laguna del Maule en los Andes Centrales del Sur. La mineralización de tipo IOA ocurre en forma de cuerpos vetiformes y brechas de magnetita, junto a apatita, piroxeno y actinolita, y se encuentra alojada en andesitas que conforman los remanentes del volcán La Zorra (edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $1,013 \pm 0,028$ Ma; Hildreth et al., 2010).

El presente estudio combina observaciones de campo, levantamientos aéreos con dron, observaciones petrográficas detalladas, análisis de microsonda electrónica (EMPA) y dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para caracterizar la mineralización de magnetita, denominada aquí "Vetas del Maule". Se identificaron cinco estilos u ocurrencias: i) Magnetita masiva, ii) Vetas de piroxeno-actinolita-magnetita, iii) Brechas hidrotermales con matriz de magnetita, iv) Magnetita diseminada, y v) Vetas de piroxeno-actinolita(±magnetita). Los análisis de EMPA de los distintos tipos de magnetita revelan una tendencia a la disminución progresiva de las concentraciones [Ti + V], [Al + Mn] y Mg, desde los estilos magnetita masiva y vetas de piroxeno-actinolita-magnetita (i y ii), hacia las brechas hidrotermales y magnetita diseminada (iii y iv) y finalmente hasta las vetas de piroxeno-actinolita(±magnetita) (v). Los datos termométricos basados en las concentraciones de Mg en magnetita indican un rango de temperatura de formación que va desde los ~950°C hasta los ~500°C, en general consistente con la disminución progresiva de las concentraciones de [Ti + V], [Al + Mn] a través de los estilos de mineralización, en una secuencia similar. Las dataciones realizadas mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en flogopita asociada a la mineralización de magnetita arrojó una edad plateau de $873,6 \pm 30,3$ ka, lo que confirma que el emplazamiento de Vetas del Maule es posterior al de la roca huésped andesítica.

Los datos microanalíticos indican que la mineralización de magnetita de Vetas del Maule se formó bajo condiciones que evolucionaron desde magmático-hidrotermales a puramente hidrotermales. Dichos datos, en conjunto con el estilo de ocurrencia de los cuerpos de magnetita (ej. vetas y brechas), apuntan a la inyección de fluidos hidrotermales ricos en hierro en un sistema volcánico como proceso desencadenante de la mineralización de magnetita. Finalmente, Vetas del Maule provee evidencia de que la mineralización de tipo IOA relacionada a sistemas volcánicos recientes pueden ser más comunes de lo pensado anteriormente, abriendo nuevas oportunidades de investigación y exploración de recursos de hierro y potencialmente de elementos críticos como tierras raras, vanadio, uranio, torio y cobalto a lo largo de la Cadena Andina.

Palabras Clave: Depósitos de Óxido de Hierro-Apatito (IOA), Laguna del Maule, Geoquímica de Magnetita, Microsonda Electrónica (EMPA), Datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por ANID a través del Programa Iniciativa Científica Milenio (Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción, NCN13_065). Apoyo adicional fue otorgado por la beca ANID-Fondecyt 1190105.

Agradecimientos: Agradecimientos a Santiago Tassara, Domínica Kausel, Diego Muñoz y Ricardo Fuentealba, Irene del Real, Rurik Romero, Diego Morata, Francisco Delgado, Andrea Herazo y María Rodríguez-Mustafa.

Referencias:

- Hildreth, W., Godoy, E., Fierstein, J., and Singer, B. (2010). Laguna Del Maule Volcanic Field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean range crest in central Chile. *Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería*, 63, 1-145.

Química mineral de la actinolita como una guía para caracterizar la evolución de depósitos del tipo Óxidos de Cobre-Hierro-Oro (IOCG)

Irene del Real¹, Gisella Palma², Martin Reich², Adam Simon⁴, Fernando Barra²

(1) Universidad Austral, Instituto de Ciencias de la Tierra, Ciencias, Valdivia, Chile

(2) Universidad de Chile, geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Ciencias, Santiago, Chile

(4) Universidad de Michigan, Geología, Earth and Atmospheric Sciences, Ann Arbor, USA

Los depósitos de óxidos de cobre-hierro-oro (IOCG) son una fuente importante de Cu, Au y elementos críticos tales como U, Co y tierras raras, que son esenciales para la transición a una sociedad carbono-neutral. A pesar de su relevancia, los IOCG continúan siendo un clan no del todo bien definido, con un rango considerable de variabilidad de características geológicas. Esto último ha dificultado el desarrollo de un modelo genético global que permita entender los controles en la formación de estos yacimientos, y que pueda servir como modelo de exploración. En este trabajo nos enfocamos en el mineral actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg}_{4-2,5}\text{Fe}_2+0,5-2,5)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), un silicato ubicuo en los depósitos IOCG y en depósitos de óxidos de hierro-apatito (IOA). Específicamente, utilizamos las variaciones químicas de elementos mayores, menores y traza en actinolita determinados mediante microsonda electrónica (EMPA) y ablación láser (LA-ICP-MS), para caracterizar la evolución de los fluidos hidrotermales involucrados en la formación del depósito IOCG Candelaria.

En base a la química mineral se pueden definir tres tipos de actinolita. El primer tipo se relaciona con actinolitas más tempranas asociadas a la mineralización de Fe, presentando éstas un mayor contenido de Ti, un menor número de hierro ($\#Fe = Fe/(Fe+Mg)$) y mayores contenidos de Sc y F. El alto contenido de Ti y bajo $\#Fe$ sugieren condiciones de mayor temperatura, y los mayores contenidos de Sc y F sugieren un fluido hidrotermal derivado de una fuente magmática más máfica. Por otra parte, el segundo y tercer tipo se relacionan con actinolitas paragenéticamente asociadas con la mineralización de Cu. En base a su química, las actinolitas asociadas al segundo evento se caracterizan por altos contenidos de Al, Sc, V, y bajos contenidos de Ti, Co y Ni, los que sugieren condiciones de menor temperatura y un fluido hidrotermal menos máfico en comparación con aquellas actinolitas del primer evento. Finalmente, las actinolitas asociadas al tercer evento presentan contenidos más altos de Zn, Co y Ni que las asociadas al segundo, y menores contenidos de V y Sc. El contenido alto de Zn sugiere que las actinolitas asociadas al tercer tipo se pueden asociar temporalmente con el evento principal de mineralización de Cu en el depósito, ya que las condiciones de solubilidad de Zn y el Cu son similares. A partir de mapas composicionales en granos de actinolita, es posible identificar diferentes texturas y asociarlas a los tres tipos de actinolitas y su temporalidad. El primer tipo es más temprano y suele encontrarse en los núcleos de los granos o a mayor profundidad, el segundo tipo es intermedio y se puede encontrar como sobrecrecimiento del primer tipo de actinolita o asociados espacialmente con zonas de sulfuros; y el tercer tipo se identifica como sobrecrecimientos del segundo tipo de actinolita.

Nuestros resultados muestran que el IOCG Candelaria se formó por la superposición de al menos dos eventos hidrotermales de mayor escala, y cuyo resultado refleja la superposición de una asociación de mena rica en Cu sobre una asociación mineral más temprana y de mayor temperatura, rica en Fe. Cuando se comparan los datos de Candelaria con análisis de actinolita de depósitos de magnetita-apatita (IOA) de la Cordillera de la Costa del norte de Chile (ej. Los Colorados, El Romeral), se identifica que las actinolitas tempranas de Candelaria presentan una química similar a las actinolitas asociadas a los eventos tardíos de formación de los depósitos IOA mencionados. Esto último sugiere que los depósitos IOCG se formarían por inyecciones episódicas de fluidos magmático-hidrotermales emitidos desde magmas que cristalizan y/o evolucionan en profundidad, y en cuyas etapas tempranas se aprecia una afinidad con fluidos de más alta temperatura, similares a sistemas de tipo IOA. Finalmente, nuestros datos apoyan el uso de las variaciones composicionales de la actinolita como una manera de comprender de mejor forma la génesis de depósitos IOCG, proveyendo una signature geoquímica distintiva de las actinolitas de los distintos eventos de alteración/mineralización.

Palabras Clave: Química de actinolita, depósitos IOA, depósitos IOCG.

Financiamiento: Este estudio está financiado por FONDECYT de postdoctorado #3200532 y en Núcleo Milenio Trazadores de Metales.

Chlorite composition from different hydrothermal deposits worldwide, and their potential for ore vectoring

Alonso Hidalgo-Gajardo¹, Laura Hernández², Osvaldo Rabbia², Thomas Ulrich³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Instituto GEA, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(3) Aarhus University, Department of Geoscience, Høegh-Guldbergs Gade 2 building 1672, 121 8000 Aarhus C, Aarhus, Denmark

Introduction

The composition of hydrothermal chlorite has been shown to record hydrothermal processes associated with the formation of mineral deposits, as evidenced by its use as a vectoring tool toward deposit centers (Cooke *et al.*, 2020). This study presents a compilation of major, minor, and trace element compositions of chlorites from 15 deposits, highlighting distinct signatures that can be used to distinguish ore deposit types.

Data collection

The chlorite compositional data collection ($n = 9111$) spans different types of ore deposits and tectonic settings. Deposits included are Tuwu ($n = 338$) and Yandong ($n = 287$) Cu porphyries, El Teniente ($n = 2027$) and Xiaokelehe ($n = 815$) Cu-Mo porphyries, Northparkes district ($n = 4137$) and Atlas ($n = 84$) Cu-Au porphyries, the Laowangou ($n = 129$) Au porphyry, the Donghua ($n = 227$) Au-Ag porphyry-epithermal, the Tongshankou ($n = 122$) Cu-Mo skarn, the Tonglushan ($n = 191$) Cu-Fe skarn, the Aguas Teñidas ($n = 281$) Cu-Zn-Pb VMS, the Niujuan Ag-Au-Pb-Zn ($n = 311$) and Zuluhong W-Cu ($n = 13$, EPMA only) polymetallic deposits, and two deposits from the Xiangshan U field ($n = 149$) (Pacey 2017; Wang *et al.* 2018, 2022; Xiao *et al.* 2018a, b; Schulz 2020; Wilkinson *et al.* 2020; Xiao & Chen 2020; Xiao *et al.* 2020, 2022; Zhang *et al.* 2020; Feng *et al.* 2021; Cao *et al.* 2022; Chu *et al.* 2022; Gisbert *et al.* 2022 and Niu *et al.* 2022).

The data were organized into two datasets: major elements (in wt%) analyzed by EPMA/SEM-EDS and trace elements (in ppm) analyzed by LA-ICP-MS. After a filtering stage to exclude significant outliers, the major element dataset contains 5758, while the trace element dataset contains 3,314 observations.

Results and Discussions

The major element composition of chlorite (mean or " $X \pm 1\sigma$ ") is represented by SiO_2 (28.0 ± 1.6), Al_2O_3 (19.0 ± 1.6), FeO (19.7 ± 5.4) and MgO (18.9 ± 4.1). FeO and MgO show the strongest correlation ($R = -0.95$). Chlorite from the polymetallic and the U deposits represent the most FeO-enriched members (22.3%-46.6% FeO). Chlorite from skarns is moderately to highly enriched in FeO, while those from the Cu-Zn-Pb VMS are comparatively depleted. The overlapping range of FeO and MgO contents of chlorite from the Cu-Zn-Pb VMS and the skarn deposits largely coincides with those from porphyry and porphyry-epithermal deposits. Chlorite from the Ag-Au-Pb-Zn and W-Cu polymetallic deposits are the most SiO_2 -depleted ($X = 24.7\%$ and 24.9% , respectively), followed by the U deposits ($X = 26.2\%$). On the contrary, the highest SiO_2 contents are found in the Donghua porphyry-epithermal deposit ($X = 32.6\%$). The most Al_2O_3 -enriched chlorite is found in the Cu-Zn-Pb VMS ($X = 22.2\%$), while the least enriched is from skarns, the Au porphyry and the Au-Ag porphyry-epithermal deposits ($X = 16.6$ - 17.1%).

Among the different deposit types, several correlations have been identified in trace elements, including Ca-Sr (0.66), Ni-Cr ($R = 0.63$); Mn-Zn, Pb-Ba-La ($0.5 < R < 0.6$); As-B, B-Cu, Ni-Cu, Li-La, Sr-La ($0.4 < R < 0.5$); As-Cu-Pb, Ca-Co, Ga-Zn, Li-Ba, Sr-Ba, ($0.3 < R < 0.4$). Prominent negative correlations include Ti-Ca, Ti-Co, Mn-Ni ($R \approx -0.4$); Ti-Sr, Li-Mn ($R \approx -0.32$). When examining each deposit individually, stronger and more diverse correlations emerge, involving elements like Mn, Zn, Co, Ni, Cr, Li, and V, among others. Several trace elements in chlorite also vary among different deposits. Ni contents show a clear increase from porphyries (Cu-Au $\rightarrow$ Cu-Mo $\rightarrow$ Au $\rightarrow$ Cu) to Au-Ag porphyry-epithermal deposits. Conversely, chlorite from the Ag-Au-Pb-Zn polymetallic deposit consistently shows a depletion in Ni. Similar patterns are observed for Cr and Li, although Li is enriched in chlorite from the Niujuan Ag-Au-Pb-Zn polymetallic deposit. Scatter plots reveal that chlorite from different deposits can be distinguished based on trace element chemistry.

We have demonstrated that chlorite from different hydrothermal systems exhibits distinct chemical signatures. Most of the discriminating elements are allocated into the octahedral sites of chlorite, and many of them serve as pathfinder elements related to hydrothermal mineralization. These findings likely are related to the variability of metals in each ore system and temperature of chlorite formation. Further studies will be needed to assess the role of the composition of the host lithology at the deposit scale.

Understanding the origin of these differences can improve the use of this mineral group as a vector toward deposit centers since element ratios like Ti/Ni and Ti/Li have been recognized to serve as proximity indicators (Wilkinson *et al.*, 2015). It also may expand the potential of chlorite in characterizing undiscovered mineralized targets.

Keywords: chlorite, mineral chemistry, mineral deposits, porphyry deposits.

Using zircon petrochronology to assess the evolution of the early Andean Cordillera in northern Chile and its relationship with IOA and IOCG metallogenesis

Jara José Joaquín¹, Barra Fernando², Reich Martin², Leisen Matthieu³, Romero Rurik², Morata Diego²

(1) Departamento de Ingeniería de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

(2) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

(3) Géosciences Environment Toulouse, Toulouse, France

The early Andes of northern Chile represents the initial development stage of the Southern Andes, one of the most remarkable continental arcs in the world [1]. Here we use a multi-proxy geochemical approach to determine the participations of mantle-crust-slab-sediments to the source of plutonic complexes to better understand the evolution of the early Andean magmatism [2] and its relationship with the metallogenesis of Andean IOA and IOCG deposits.

TECTONO-MAGMATIC EVOLUTION OF THE EARLY ANDES

Our results show that plutonism occurred over a period of ~120 My with six distinct episodes. The first and second ones between 215–203 and 200–185 Ma, when continental crust underwent continuous thinning from ~30 to ~22 km. Minor sediments and crustal contributions are also noted. Consequently, magmas became increasingly depleted, displaying a signature similar to N-MORB and relatively low oxidation states. This suggests that plutonism occurred at an attenuated margin [3] in a transtensional regime with increasing plate decoupling, consistent with structural observations in the forearc [4] and an isotopic ‘pull-up’ of its igneous units [5]. This period ended with an arc-normal extension with La Negra volcanic event (~180–155 Ma) [4].

During the third episode (160–145 Ma) crustal thickness reached ~20 km and crystallization temperatures were ~850 °C, suggesting a magmatism led by decompressional melting [6]. This is reflected in a highly depleted and reduced signature with whole-rock and zircon ratios consistently near or below N-MORB references. This is consistent with: (i) strong arc-normal extension and shallow plutonic emplacement [4,7]; and (ii) negative to neutral, trench normal absolute and relative convergence rates [8].

The fourth and fifth episodes occurred between 138–121 and 120–108 Ma, respectively. During them crustal thickness reached ~35 km. Slightly lower crystallization temperatures and higher fluid and sediment contributions are also recorded. Magmas became more enriched, hydrated and oxidized, which could be explained by: (i) transition to an oblique transtensional regime [4,7,9]; and (ii) increased coupling between plates associated with higher convergence rates [4,8].

The last episode occurred in late Albian to Cenomanian (103–94 Ma). A crustal thickness of >35 km and increasing slab-derived fluids and lesser sediments contributions, as well as a depleted mantle source, are best explained by an extensional to transtensional setting with high convergence rates and relative decoupling of plates [4]. This is also supported by relatively high oxygen fugacity markers and low crystallization temperatures. These findings are concordant with the geological record in the back-arc [10] and changes in convergence rates [8].

IMPLICATIONS FOR THE METALLOGENESIS OF ANDEAN IOA/IOCG DEPOSITS

The early Andes of northern Chile hosts some relevant IOA and IOCG deposits [11]. However, its plutonic complexes are representative of the generality of intrusive units in most continental arcs in rather thinned crusts [12]. Therefore, it is hard to correlate the genesis of these mineral systems with specific magmatic conditions. Nevertheless, our petrogenetic indicators give us some insights about the role that tectono-magmatic changes and magmatic conditions could have played in the formation of andean IOA and IOCG deposits.

Most andean IOA deposits were formed between 132 and 128 Ma [11], concurrent or after the transition from extensional to transtensional settings [4,7,9,11]. This suggests that magmatism not only contributed to their formation as a heat source, but probably as the main source of the mineralizing fluids and metals in these systems. All the elements needed to generate IOA and IOCG deposits in the basin model [13] were in place before this tectonic change [7,9], but no significant ones were formed during that time span. Prior, magmatism was depleted, reduced and dehydrated [5,6,14], does not have the proper conditions to mobilize siderophile and chalcophile elements characteristic of IOA and IOCG deposits.

In contrast, the tectonic shift brought slight but growing sediment and fluid additions to the magmatic factory, generating more enriched, hydrated and oxidized magmas during the fourth plutonic event. Though, not sufficient to scavenge key elements in IOCG deposits but enough to trigger the genesis of IOA systems. Consequently, a few IOCG deposits were generated between 138 and 120 Ma, being the most relevant ones formed after 120 Ma [11]. The continuous addition of sediments and slab-derived fluids during more than 15 My produced more enriched, hydrated and oxidized magmas able to incorporate siderophile and chalcophile elements since volatile ligands were increasingly available [11]. This may have helped to enhance the formation of IOCG deposits between 120 and 110 Ma.

Keywords: zircon petrochronology, early Andes, metallogenesis, IOA and IOCG deposits.

References:

- [1] Ducea et al. (2021b) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 43, 10.1–10.33 (2015).
- [2] Jara et al. *Nat Commun* 12, 4930.
- [3] Charrier et al. (2007) In: *The Geology of Chile*. Eds Moreno, T. & Gibbons, W., 21–114, The Geological Society of London..
- [4] Scheuber & González (1999) *Tectonics* 18, 895–910.
- [5] Oliveros et al. (2020) *Gondwana Res.* 80, 202–227.
- [6] Parada et al. (2007) In: *The Geology of Chile*, Eds Moreno, T. & Gibbons, W., 115–146, The Geological Society of London.
- [7] Dallmeyer et al. (1996) *J. Geol.* 104, 19–40.
- [8] Maloney et al. (2013) *Tectonics* 32, 1–17.
- [9] Seymour et al. (2020) *Tectonics* 39, e2019TC005702.
- [10] Mpodozis & Allmendinger (1993) *GSA Bull.* 105, 1462–1477.
- [11] Richards et al. (2017) *Economic Geology*, 112, 295–318.
- [12] Barton, M.D. (2014) In: *Treatise on Geochemistry*. 515–541, Elsevier.
- [13] Barton & Johnson (1996) *Geology*, 24, 259–262.
- [14] Pichowiak, S. (1994) In: *Tectonics of the Southern Central Andes*. 203–217, Springer

Reconstrucción de la evolución termal de los depósitos tipo magnetita-apatita chilenos mediante termometría de magnetita

Gisella Palma¹, Martin Reich², Fernando Barra², José Tomás Ovalle³, Irene del Real⁴, Adam C. Simon³

(1) Escuela de Geología, Universidad Mayor, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Departamento de Geología y Núcleo Milenio Trazadores de Metales, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, 1100 North University Ave, Ann Arbor, MI, USA

(4) Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral, Chile, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

La magnetita (Fe_3O_4) se forma bajo un amplio rango de condiciones físico-químicas en ambientes ígneos, sedimentarios, metamórficos y en una variedad de depósitos minerales. Este mineral es el principal constituyente de los depósitos tipo magnetita-apatita (*iron oxide-apatite*-IOA) que contienen cientos de millones a varios billones de toneladas de hierro. Adicionalmente, los IOA contienen elementos críticos como REE, V y Co, esenciales en la producción de tecnologías verdes y para la transición global hacia bajas emisiones de carbono.

La provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa del norte de Chile alberga varios depósitos tipo magnetita-apatita estructuralmente asociados al Sistema de Falla Atacama (e.g., Los Colorados, El Romeral y Cerro Negro Norte). Por otra parte, el depósito IOA El Lago representa un ejemplo excepcionalmente preservado de este tipo de mineralización, ubicado en el altiplano chileno. Los cuerpos de magnetita de El Lago están genéticamente asociados a la evolución de un sistema volcánico durante el Plio-Pleistoceno.

En los depósitos IOA, la mineralización de magnetita ocurre como cuerpos tabulares masivos, brechas, vetas, stockwork, diseminada y reemplazando rocas de caja permeables, comúnmente acompañada de apatita, actinolita, piroxeno y sulfuros (<50% modal). En los últimos años, el estudio de composición química e isotópica de la magnetita ha sentado las bases para entender la génesis de los depósitos IOA. Particularmente, las variaciones composicionales (Ti, V, Al, Mn y Ga) de la magnetita revelan precipitación bajo variables condiciones fisicoquímicas, que abarcan desde cristalización de magnetita ígnea de alta temperatura hasta la precipitación de magnetita puramente hidrotermal, que se forma a partir de la precipitación de fluidos de baja temperatura. Sin embargo, a pesar de que la temperatura de formación de magnetita es un parámetro clave en el control de la mineralización de hierro, su determinación es compleja. Esto genera incertidumbre en torno a los principales modelos genéticos que invocan procesos de inmiscibilidad líquida, reemplazo metasomático y precipitación de hierro a partir de fluidos magmáticos-hidrotermales (modelo de flotación) para explicar la formación de estos depósitos.

En este estudio reconstruimos la evolución termal de una serie de depósitos chilenos de distintos tamaños y subtipos, incluyendo Los Colorados (tipo-intrusivo), El Romeral (transicional), Cerro Negro Norte (tipo-hidrotermal), Carmen, Fresia y Mariela (tipo-pegmatítico) y El Lago (tipo-volcánico y/o aéreo). Se recopiló 3.126 análisis puntuales de magnetita obtenidos mediante microsonda electrónica (EPMA) y ablación láser (LA-ICP-MS) de estudios anteriores, y se calcularon temperaturas utilizando el termómetro de magnetita ($T_{\text{Mg-mag}}$) propuesto por Canil y Lacourse (2020). La calibración empírica $T_{\text{Mg-mag}} (^{\circ}\text{C}) = -8.344(\pm 322) / \ln X_{\text{Mg}} - 4.13(\pm 0.28) - 273$, la cual considera un error de $\pm 50^{\circ}\text{C}$, se basa en experimentos que demuestran que la concentración de Mg depende fuertemente de la temperatura para un amplio rango de condiciones P-T-X- fO_2 . Las temperaturas obtenidas se analizaron en función de la temporalidad de los distintos tipos de magnetita, de acuerdo con sus microtexturas, y el contenido de Ti, V y Ga, cuya incorporación en la estructura de la magnetita es sensible entre otros parámetros a la temperatura.

Los resultados muestran que este tipo de depósitos se forman bajo condiciones puramente magmáticas ($\sim 1.000\text{--}800^{\circ}\text{C}$), a magmáticas-hidrotermales ($\sim 800\text{--}600^{\circ}\text{C}$), a netamente hidrotermales ($< 600^{\circ}\text{C}$). Los patrones de enfriamiento de magnetita, tanto a escala de depósito y escala de grano, son consistentes con modelos genéticos que invocan un origen ígneo y magmático-hidrotermal combinado, revelando una predominancia de condiciones hidrotermales dominadas por fluidos. Asimismo, son consistentes con datos de isótopos estables de $\delta^{56}\text{Fe}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en magnetita de depósitos IOA de Chile y otros distritos alrededor del mundo, que indican que esta cristaliza a partir de magmas intermedios y fluidos acuosos de alta temperatura derivados de fundidos silicatados.

Palabras Clave: magnetita-apatita, magnetita, termometría, elementos traza, modelo genético.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por ANID mediante el Programa Iniciativa Científica Milenio (NCN13_065) y FONDECYT #1190105. Financiamiento adicional fue otorgado por el proyecto ANID-FONDAP 15090013 "Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA".

Referencias:

- Palma, G., Reich, M., Barra, F. et al. (2021) Thermal evolution of Andean iron oxide-apatite (IOA) deposits as revealed by magnetite thermometry. Scientific Reports 11, 18424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97883-3>.

Apatitos detríticos de catodoluminiscencia verde como un indicador de la presencia de Depósitos de Pórfido de Cobre

Héctor Pizarro¹, Michel Gregoire², Farhad Bouzari³, Sonia Rousse², Stefano Salvi², Eduardo Campos⁴, Brian Townley¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Université Toulouse, GET, IRD, CNRS, UPS, 14 avenue E. Belin, Toulouse, Francia

(3) MDRU - Mineral Deposit Research Unit, Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, University of British Columbia, 2020-2207 Main Mall, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá

(4) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 610, Antofagasta, Chile

La comparación de la catodoluminiscencia (CL) y las características geoquímicas de apatitos detríticos presentes en los sedimentos de Quebrada Quipisca-Parca (Norte de Chile) con las de los apatitos del depósito de pórfido de cobre (DPC) vecino de Cerro Colorado y otros importantes yacimientos del Norte de Chile, tales como Chuquicamata, Escondida, Mirador y Esperanza, destaca el potencial de este mineral accesorio común como un trazador de la presencia de este tipo de depósitos. Varios estudios han demostrado que el apatito en los DPC es sensible a los cambios fisicoquímicos que se producen durante la interacción con los fluidos hidrotermales, cuya magnitud depende del tipo de alteración y/o tamaño de la intrusión (e.g. Pan et al., 2016; Mao et al., 2016). Estos cambios se pueden manifestar a través de variaciones en el color de luminiscencia y la señal geoquímica del apatito (Bouzari et al., 2016; Cao et al., 2021). En este estudio comparamos doce muestras de sedimentos fluviales de la Quebrada Parca – Quipisca y dieciséis muestras de diferentes zonas de alteración hidrotermal provenientes de los DPCs de Cerro Colorado (5), Chuquicamata (4), Escondida (3), Mirador (2) y Esperanza (2). En las zonas de alteración potásica, propilítica y filica débil de los DPCs se encuentran apatitos primarios inalterados, es decir, no afectados por la alteración, los cuales presentan un color de catodoluminiscencia amarillo o marrón anaranjado y contienen valores altos de Mn, Na, Cl y S, mientras que Ca es bajo. En estas zonas de alteración también se encuentran apatitos alterados, los cuales muestran CL verde y tiene concentraciones bajas de Mn, Na, Cl, S y altas de Ca. En los pórfidos de Chuquicamata y Escondida estos apatitos son completamente verdes, mientras que en los otros depósitos el color verde se encuentra como parches en apatitos de color amarillos y/o pardos. Nosotros interpretamos que los primeros corresponden a una transformación total de un apatito primario en un apatito hidrotermal, mientras que los segundos a transformaciones parciales. El apatito no fue reconocido en la zona de alteración filica intensa. Las gravas de la quebrada Parca - Quipisca contienen varios tipos de apatitos. Estos incluyen variedades luminiscentes de color amarillo y pardo anaranjado con concentraciones altas de Mn, Na, Cl y S y bajas de Ca, es decir, CL y características geoquímicas similares a las de los apatitos primarios de las zonas de alteración de los DPCs. En los sedimentos también se encuentran apatitos de CL verde, con valores bajos de Mn, Na, Cl y S, y altos de Ca, como los apatitos ígneos alterados. También se encontró en las gravas una variedad de apatitos detríticos con CL rosa-púrpura. Su firma geoquímica es similar a la de los apatitos primarios. Estos apatitos podrían ser producto de la interacción entre apatitos primarios y procesos exógenos o endógenos de menor temperatura (Kempe, 2002). Las mayores proporciones de apatitos de CL verde en las gravas ocurren a 4, 8 y 12 km al oeste y 1 km al este del depósito, lo que indica un cambio en la dirección y velocidad de erosión del pórfido de Cerro Colorado. Por lo tanto, nuestros resultados sugieren que el apatito con CL verde en los sedimentos podría ser un buen mineral indicador de la presencia de depósitos de pórfidos de cobre cercanos, constituyendo una herramienta de exploración rápida y eficiente para este tipo de depósitos.

Palabras Clave: Desierto de Atacama, Apatito, Catodoluminiscencia, Mineral Indicador de Pórfido (PIMs).

Financing: Proyecto ANID-Fondecyt de Postdoctorado 3210291 y Proyecto LMI – COPEDIM.

Referencias:

- Bouzari, F., Hart, C. J., Bissig, T., & Barker, S., 2016. Hydrothermal alteration revealed by apatite luminescence and chemistry: a potential indicator mineral for exploring covered porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 111(6), 1397-1410.
- Jian Cao, M., Evans, N. J., Hollings, P., Cooke, D. R., McInnes, B. I., & Qin, K., 2021. Apatite texture, composition, and O-Sr-Nd isotope signatures record magmatic and hydrothermal fluid characteristics at the Black Mountain porphyry deposit, Philippines. *Economic Geology*, 116(5), 1189-1207.
- Kempe, U., and Götze, J., 2002. Cathodoluminescence (CL) behaviour and crystal chemistry of apatite from rare-metal deposits: *Mineralogical Magazine*, v. 66, p. 151-172.
- Mao, M., Rukhlov, A. S., Rowins, S. M., Spence, J., & Coogan, L. A., 2016. Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. *Economic Geology*, 111(5), 1187-1222.
- Pan, L. C., Hu, R. Z., Wang, X. S., Bi, X. W., Zhu, J. J., & Li, C., 2016. Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China. *Lithos*, 254, 118-130.

Evaluación del uso combinado de minerales indicadores de pórfidos (PIMs) para la exploración de sistemas mineralizados tipo pórfidos cupríferos bajo cobertura de gravas en el Desierto de Atacama

Héctor Pizarro¹, Brian Townley¹, Michel Gregoire², Sonia Rousse², Pamela Canales¹, Rodrigo Riquelme³

(1) Universidad de Chile, Departamento de geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Université de Toulouse, GET, IRD, CNRS, UPS, 14 avenue E. Belin, Toulouse, 31400, Francia

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de ciencias geológicas, Facultad de ingeniería y ciencias geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

El Desierto de Atacama presenta una gran cantidad de depósitos de pórfidos cupríferos (DPCs) de edad Paleoceno-Oligoceno, lo cual convierte esta región en una de las provincias metalogénicas más fértiles a nivel mundial. Los DPCs son vinculados a magmatismo calco-alcalino producido en márgenes tectónicos convergentes y resultan de la circulación de fluidos hidrotermales derivados de magmas oxidados (FMQ +1 a +2), ricos en agua ($\geq 4\%$ en peso de H_2O) y con un alto grado de fraccionamiento (Richard, 2003). La interacción fluido-roca genera minerales de alteración hidrotermal típicos y también puede modificar o crear minerales accesorios. Así, cada etapa en la evolución magmática - hidrotermal que participa en la formación de un DPC puede ser trazada a partir de las características petrográficas y geoquímicas de minerales accesorios heredados (circón), minerales modificados (apatito) y/o la formación de nuevos minerales (magnetitas). Varios estudios han documentado estas características en una variedad de depósitos minerales accesorios, de alteración y de mena de DPCs, las cuales han permitido diferenciarlos de minerales provenientes de intrusivos no mineralizados (Pizarro et al., 2020; Nadoll et al., 2015). Algunos de estos minerales pueden resistir la meteorización y el transporte sedimentario, por ende, tienen el potencial de utilizarse como minerales indicadores de pórfidos (PIM, por sus siglas en inglés). De esta manera, el uso de minerales indicadores resistentes pueden ser una poderosa herramienta en la exploración de yacimientos minerales cubiertos por sedimentos, lo cual ya ha sido corroborado en la localización de una variedad de depósitos minerales (Griffin and Ryan, 1995). Sin embargo, su uso en la búsqueda de depósitos de pórfido cuprífero ocultos bajo una cobertura sedimentaria es algo que recién comienza a estudiarse. Mediciones de umbrales geoquímicos en circones ($Hf > 8.750$ (ppm), $Eu/Eu^* > 0.4$, $10.000 \times (Eu/Eu^*)/Y > 1$, $(Ce/Nd)/Y > 0.01$, $Dy/Yb < 0.3$, $Th/U < 1 - > 0.1$) han sido utilizados para diferenciarlos de minerales provenientes de intrusivos no mineralizados (Pizarro et al., 2020) y su uso como PIMs en cobertura sedimentaria ha sido testeado en sedimentos glaciares en la provincia metalogénica de British Columbia (Lee et al., 2021) y en las gravas del Desierto de Atacama (Pizarro et al., 2023 [submitted]), teniendo un éxito relativo.

Otro ejemplo se presenta para magnetita, mineral en el cual las concentraciones de Mg, Al, Ti, V, Mn, Co y Ni han sido utilizadas para discriminar un origen hidrotermal, pero cuyo uso como un PIMs solo ha sido testeado en sedimentos de origen glaciar en la provincia metalogénica de British Columbia y Yukon (Canadá) donde la concentración de magnetitas con características de PIMs depende de la distancia al DPC (Pisiak et al., 2017; McCurdy et al., 2022). A partir de esto se hipotetiza que circones y magnetitas de origen detrítico tienen un alto potencial para ser usados como PIMs en el registro sedimentario de ambientes desérticos. Sin embargo, la evaluación de su potencial para la exploración debe considerar su ambiente deposicional.

Así, esta investigación evalúa las características petrográficas (observaciones microscópicas) y señales geoquímicas de circones y magnetita detríticas (EMPA y LA-ICP-MS) de gravas del registro estratigráfico del Desierto de Atacama, tomando en cuentas sus ambientes deposicionales. Para lo anterior se evaluaron dos ambientes deposicionales típicos de la evolución Eocena tardía- Reciente del Desierto de Atacama, adyacentes a DPCs. Por una parte, un sistema caracterizado por facies fluviales efímeras, que permita reconocer hasta qué distancia aguas abajo de la fuente es posible reconocer los PIMs (DPC de Cerro Colorado), por otra parte, una secuencia sedimentaria caracterizado por facies aluviales-fluviales de un abanico aluvial, que permite evaluar la dispersión y distribución de PIMs a lo ancho y largo del lóbulo de un abanico aluvial (DPC de Potrerillos).

Los resultados preliminares de este estudio muestran que algunos circones detríticos presentes en el registro estratigráfico adyacente al DPC de Cerro Colorado presentan características PIMs, lo cual indicaría que estos minerales fueron erosionados de un DPC. Mientras que algunas magnetitas de origen detrítico tienden a presentar bajas concentraciones de Ti y V y valores elevados de la relación Ni/Cr donde los valores de Ti vs Ni/Cr y V vs Ti caen en el campo de magnetitas hidrotermales propuestos por Dare et al. (2014) y Nadoll et al. (2015). Así, estos primeros resultados muestran que el uso combinado de PIMs puede ser una poderosa herramienta en la búsqueda de depósitos de cobre cubiertos cuando se vincula su origen y proveniencia en función de la evolución del paisaje correspondiente.

Palabras Clave: Circón, Magnetita, PIMs, Exploraciones geológicas, Gravas de Atacama.

Financiamiento: La investigación fue financiada por el Proyecto ANID-Fondecyt de Postdoctorado 3210291.

Referencias:

- Dare, S. A., Barnes, S. J., Beaudoin, G., Méric, J., Boutroy, E., & Potvin-Doucet, C., 2014. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, 49(7), 785-796.
- Griffin, W. L., & Ryan, C. G. 1995. Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration. *Journal of geochemical Exploration*, 53(1-3), 311-337.
- Lee, R.G., Byrne, K., D'Angelo, M., Hart, C.J., Hollings, P., Gleeson, S.A., Alfaro, M., 2021. Using zircon trace element composition to assess porphyry copper potential of the Guichon Creek batholith and Highland Valley Copper deposit, south-central British Columbia. *Miner. Deposita* 56(2), 215-238.
- McCurdy, M. W., Peter, J. M., McClenaghan, M. B., Gadd, M. G., Layton-Matthews, D., Leybourne, M. I., Garrett, R. E., Petts, D. C., Jackson, S. E. & Casselman, S., 2022. Evaluation of magnetite as an indicator mineral for porphyry Cu exploration: a case study using bedrock and stream sediments at the Casino porphyry Cu-Au-Mo deposit, Yukon, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 22(2).
- Nadoll, P., Mauk, J. L., Leveille, R. A., & Koenig, A. E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita*, 50(4), 493-515.
- Pisiak, L. K., Canil, D., Lacourse, T., Plouffe, A., & Ferbey, T., 2017. Magnetite as an indicator mineral in the exploration of porphyry deposits: a case study in till near the Mount Polley Cu-Au deposit, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 112(4), 919-940.
- Pizarro, H., Campos, E., Bouzari, F., Rousse, S., Bissig, T., Gregoire, M., Riquelme, R., 2020. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore. Geol. Rev.* 126, 103771.
- Richards, J. P., 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8), 1515-1533.

Signaturas magmáticas del Batolito Copiapó, Distrito Candelaria: ¿Evidencias para un modelo de formación de IOCG Andino en dos etapas?

Rurik Romero¹, Fernando Barra¹, Martin Reich¹, María José Tapia¹, Andres Ojeda¹, Irene del Real², Adam Simon³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología y Núcleo Milenio Trazadores de Metales, FCFM, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Avenida Eduardo Morales Miranda, Edificio Emilio Pugín, Valdivia, Chile

(3) University of Michigan, Department of Earth and Environmental Sciences, Ann Arbor, MI, United States

En este trabajo se reportan los primeros análisis de elementos traza y U-Pb en circones de las unidades plutónicas del Batolito de Copiapó asociadas al yacimiento de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG) de Candelaria. Estos nuevos datos geoquímicos entregan información respecto de la evolución del sistema magmático y su potencial relación con los eventos de mineralización de Fe y Cu en el distrito de Candelaria.

El magmatismo temprano identificado en el área de estudio está representado por unidades de tonalitas a monzodioritas emplazadas entre los 118-115 Ma. Los análisis de tierras raras en circón para este evento magmático indican marcadas anomalías negativas de Eu (bajos valores de las razones Eu/Eu*), un bajo fraccionamiento de tierras raras medianas y una baja fugacidad de oxígeno ($\Delta FMQ < 0$). Por otro lado, las temperaturas medias de cristalización se estiman por sobre los 700°C. En contraste, el magmatismo tardío (115-110 Ma) presenta características geoquímicas distintas al anteriormente descrito, marcando una transición respecto al evento temprano. Los datos de elementos traza en circones de las intrusiones granodioríticas (~110 Ma) indican mayores valores de las razones Eu/Eu* y condiciones de mayor fugacidad de oxígeno ($\Delta FMQ \sim +1$). Además, presentan un mayor fraccionamiento de tierras raras intermedias y menores temperaturas de cristalización.

Estos datos permiten concluir preliminarmente que el Batolito de Copiapó está conformado por dos eventos magmáticos diferentes. El primer evento magmático (~118-115 Ma) se asociaría a magmas reducidos con contenidos moderados a leves de H₂O, alta temperatura, y con un significativo grado de fraccionamiento por plagioclasa. Este evento podría estar asociado a la mineralización temprana rica en Fe y pobre en Cu del tipo óxido de hierro-apatito (IOA), identificado en Candelaria, muy probablemente relacionada a un ambiente tectono-magmático configurado por condiciones de adelgazamiento cortical y extensión. A este evento magmático temprano le seguiría la etapa tardía a ~110 Ma, asociada a magmas con mayores contenidos de agua que condujeron a condiciones más oxidantes y a temperaturas de cristalización más bajas. Estas condiciones son semejantes a las identificadas para sistemas hidrotermales ricos en cobre.

Las señales geoquímicas de los intrusivos estudiados apuntan a un engrosamiento cortical gradual y/o cambios tectono-magmáticos que marcarían una transición desde condiciones afines a la formación de sistemas enriquecidos en Fe, a condiciones afines a sistemas ricos en Cu. Por lo anterior, es posible conjeturar que las diversas ocurrencias minerales encontradas en el distrito Candelaria fueron probablemente el resultado de una superposición de una etapa magmática temprana que condujo a una mineralización rica en hierro de tipo IOA, seguida de una etapa rica en cobre y azufre relacionada con un magmatismo más evolucionado con características geoquímicas similares a las asociadas a los sistemas de pórfidos de Cu.

Palabras Clave: IOCG tipo andino, Candelaria, Batolito Copiapó, Geocronología, Petrocronología.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto ANID-FONDECYT 1190105 otorgado a FB y apoyado por el Núcleo Milenio Trazadores de Metales (NMTM). Agradecimientos adicionales a ANID por la Beca de Doctorado Nacional adjudicada a RR. La instrumentación del LEM-UChile fue financiada por el proyecto de instrumentación ANID-FONDEQUIP EQM120098 y proyecto FONDAP 15090013, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA).

Geoquímica de rocas con alteración propilítica y sedimentos presentes en Quebrada Quipisca – Parca adyacente al pórfido cuprífero Cerro Colorado, región de Tarapacá

Felipe Sierralta Castillo¹, Héctor Pizarro Martínez², Eduardo Campos Sepúlveda¹, Brian Townley²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

En los últimos 20 años los descubrimientos de depósitos tipo pórfido cuprífero han disminuido notablemente, esto debido a que gran parte de las evidencias de depósitos expuestas en superficie ya han sido exploradas y las que registran resultados positivos corresponden solo al 20,6% de los hallazgos entre 2000 y 2015 (SERNAGEOMIN 2016; 2020). Con el objetivo de incrementar el número de hallazgos en exploración nace la necesidad de evaluar técnicas innovadoras que permitan explorar depósitos minerales bajo cobertura de gravas (Wilkinson et al., 2015; Plouffe et al., 2022). Además, los métodos tradicionalmente utilizados en la exploración de depósitos de cobre, tales como, el uso de sondeos, métodos geofísicos, dataciones, entre otros, presentan un alto valor económico, tiempo y han sido poco efectivos a la hora de evaluar grandes extensiones de terreno (Holiday & Cooke, 2007). Así, el estudio de Minerales Indicadores de Pórfido (PIM's, por sus siglas en inglés) puede ser un método alternativo y complementario para la búsqueda de este tipo de depósitos en zonas cubiertas.

En este contexto, el estudio de PIMs en quebradas adyacentes a depósitos del tipo pórfido cuprífero puede tener una gran relevancia en la aplicación de esta metodología, ya que permiten el acceso a rocas que no se encuentra visibles en superficie (cubiertas por sedimentos) y también a sedimentos que pueden contener trazas de rocas y minerales provenientes de la denudación del depósito de pórfido cuprífero. Así, el objetivo principal de este trabajo es evaluar las variaciones geoquímicas y mineralógicas de la alteración propilítica presente en rocas y sedimentos a lo largo de quebradas como una herramienta trazadora de la presencia de depósitos porfídicos. Además, esto permitirá corroborar si existe una relación entre la alteración propilítica en las paredes de la Quebrada Quipisca – Parca con la distancia al pórfido cuprífero de Cerro Colorado (Paleoceno Superior – Eoceno Medio). A partir de 16 muestras de rocas tomadas a lo largo de la quebrada, 15 muestras provenientes del depósito y 12 muestras provenientes de los sedimentos, se realizaron descripciones petrográficas mediante microscopía óptica, enfocada en rocas con alteración propilítica y su mineralogía, análisis geoquímico (ICP-MS) y conteo de clastos con alteración en sedimentos.

Los resultados indican que, a través de la descripción petrográfica y enfocándose en los minerales de la alteración propilítica, es posible identificar subfacies de clorita y epidota relacionables a zonas cercanas al depósito (Cooke et al., 2014), las cuales se detectan hasta unos 5 km de distancia a este. En las rocas obtenidas del depósito se midieron valores elevados de Mo, Cu y Ag y valores bajos de Zn, Pb, Sb y As. A lo largo de la quebrada los valores de Cu – Mo disminuyen y aumentan los de Zn, Pb, Sb y As. Esta variabilidad geoquímica identificada en las rocas puede ser asociada a un patrón de halos (Sillitoe 2010; Kouzmanov et. al., 2012). Un halo de Cu – Mo es identificado a 1 km del yacimiento, el cual es seguido por un halo de Ag – Pb – Zn que se extiende hasta 2 km. Posterior a esto hay una disminución de los valores de Zn, y se genera un halo de Ag – Pb que se extiende entre 2 y 4 km. Finalmente a 8 km del yacimiento se identifica un halo de As – Sb (elementos más distales). En los sedimentos no se detectaron variaciones geoquímicas importantes, sin embargo, se hallaron clastos con Cu y una mayor presencia de clastos con alteración propilítica aguas abajo del pórfido, pudiendo detectarse esta señal hasta 12 km de este. Esto último indica que es posible, mediante el método de conteo de clastos, inferir la presencia de un centro termal responsable de generar este tipo de alteración. Las herramientas utilizadas en este trabajo demuestran que esta metodología puede ser una herramienta útil, de bajo costo y complementaria a otros métodos en campañas tempranas de exploración.

Palabras Clave: Depósitos de mena cubiertos, Minerales Indicadores de Pórfido (PIMs), Desierto de Atacama, Elementos geoquímicos distales, Elementos geoquímicos proximales.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado con el Proyecto ANID-Fondecyt de Postdoctorado 3210291 (IR: H. Pizarro).

Agradecimientos: Agradecer enormemente al Proyecto ANID-Fondecyt de Postdoctorado 3210291 por el financiamiento de este trabajo y la oportunidad de participar en esta investigación.

Referencias:

- SERNAGEOMIN. (2016). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: Blancos clave para la exploración minera. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- SERNAGEOMIN. (2020). Anuario de la minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería., Santiago.
- Wilkinson, J., Chang, Z., Cooke, D., ... Gemmell, J. (2015). The chlorite proximitor: A new tool for detecting porphyry ore deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 152, 10-26.
- Plouffe, A., Kjarsgaard, I., Ferbey, T., ... McNeil, R. (2022). Detecting Buried Porphyry Cu Mineralization in a Glaciated Landscape: A Case Study from the Gibraltar Cu-Mo Deposit, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 117, 777-799.
- Holiday, J., & Cooke, D. (2007). Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration: Toronto*. Prospectors and Developers Association of Canada, 791-809.
- Cooke, D., Baker, M., Hollings, P., ... Inglis, S. (2014). New Advances in Detecting the Distal Geochemical Footprints of Porphyry Systems - Epidote Mineral Chemistry as a Tool for Vectoring and Fertility Assessments. *Economic Geology, Special Publication* 18, 127-152.
- Kouzmanov, K., & Pokrovski, G. (2012). Hydrothermal Controls on Metal Distribution in Porphyry Cu (-Mo-Au) Systems. *Society of Economic Geologists*, 16, 573–618. Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.

Petrocronología en circón de depósitos tipo pórfido de Cu-Mo±Au de la franja del Cretácico Inferior, Cordillera de la Costa, Chile

María José Tapia¹, Fernando Barra¹, Martin Reich¹, Rurik Romero¹, Andrés Ojeda¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología y Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Subducción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

En los últimos años el cobre ha pasado a ser considerado un elemento estratégico, debido a una creciente demanda por este metal, relacionada al desarrollo tecnológico e industrial en la sociedad actual. Los depósitos tipo pórfido de Cu-Mo (PDC) son la principal fuente de este metal a nivel mundial, como también de otros elementos como el molibdeno, oro y renio [1]. En Chile, los PDC ocurren principalmente en la zona centro-norte y se agrupan en franjas metalogénicas de distinta edad [2]. Entre ellas, destacan las franjas del Eoceno-Oligoceno y Mioceno-Plioceno, que concentran los depósitos tipo pórfido cuprífero de mayor envergadura a nivel global [2]. En contraste, los PDC asociados a la franja del Cretácico en la Cordillera de la Costa, son de menor tamaño, en su mayoría sub-económicos, y en comparación con los PDC de la Cordillera de los Andes, pobremente estudiados [3].

El circón es un mineral accesorio común en intrusiones félsicas, muy resistente a la alteración química y mecánica [4]. Además, es una fase mineral que incorpora varios elementos a nivel de trazas, entre ellos, Ti, U y Th, y elementos del grupo de las tierras raras (del inglés, rare earth elements o REE). Por una parte, la incorporación de U en circón permite que éste pueda ser datado mediante el método U-Pb determinando así la edad de cristalización del intrusivo [5]; por otra, las concentraciones de REE en circón conllevan a establecer las condiciones de formación del magma y las características de aquellos que presentan un potencial de generar depósitos minerales, es decir, su fertilidad metalogénica [5-7].

Este estudio se centra en intrusivos cercanos a la localidad de Domeyko, en la Cordillera de la Costa de la cuarta región de Chile, obteniéndose edades U-Pb y datos de elementos traza mediante la técnica de espectrometría de masas de acoplamiento inductivo y ablación láser (LA-ICP-MS). Los datos geoquímicos obtenidos se utilizaron para determinar las condiciones de formación de intrusivos asociados a pórfidos cupríferos del Cretácico Inferior —entre ellos, Pajonales, Cristales, Cachiyuyo, Dos Amigos y Tricolor. El objetivo principal es identificar las características geoquímicas distintivas del circón que permiten diagnosticar la fertilidad de los sistemas magmáticos de la zona de estudio, y compararlos con aquellos indicadores de fertilidad en los pórfidos gigantes y supergigantes como El Salvador, Chuquicamata-El Abra y El Teniente.

Los intrusivos estudiados del Cretácico Inferior están asociados a depósitos tipo pórfido Cu-Mo±Au de bajos tonelajes (<1,5 Mt Cu), con edades entre ~116-108 Ma, los cuales, de acuerdo con estudios anteriores, fueron emplazados en corteza adelgazada (~30 km) o moderadamente engrosada (30-40 km), producto de un régimen tectónico transpresivo [3]. Estos depósitos presentan circones con una elevada razón Eu/Eu* (>0,4), atribuible al alto contenido de agua en el magma que forma mineralización de tipo PDC. Conjuntamente, se observa una correlación negativa entre Dy y Yb/Dy, lo que se interpreta como evidencia de fraccionamiento temprano de anfíbol. Los PDC estudiados tienen valores moderados de fugacidad de oxígeno (ΔFMQ de hasta ~ +1), lo que indica magmas levemente oxidados, esperable para un ambiente de arco.

Al comparar estos resultados con datos de los grandes pórfidos cupríferos desarrollados en corteza engrosada (>45 km) durante condiciones tectónicas compresivas en el Cenozoico, se concluye que el potencial regional de la mineralización de PDC del Cretácico está relacionado, en primera medida, con la hidratación del magma. Asimismo, se destaca la importancia del fraccionamiento de anfíbol como un proceso de primer orden para la generación de un PDC, ya que promovería la reabsorción de fases sulfuradas en el magma. También, se establece la relación entre magmas más oxidados (ΔFMQ ~ +1-3) y la formación de yacimientos de mayor tamaño, posiblemente debido al fraccionamiento en profundidad de anfíbol ± granate, así como a la madurez del arco, volumen de actividad magmática y a la contribución de fluidos oxidados desde el “slab”.

Palabras Clave: Pórfidos de cobre, Fertilidad, Circón.

Financiamiento: Esta investigación es financiada por el proyecto ANID-FONDECYT #1190105 “Source and Metal Fertility of Magmas from the Early Jurassic to Late Cretaceous Continental Magmatic Arc, Coastal Cordillera of Northern Chile (26° to 30°S)” adjudicado por F.B. y el “Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción” NC130065 perteneciente a la Iniciativa Científica Milenio (ICM). El trabajo analítico en LA-ICP-MS fue financiado por el proyecto de instrumentación ANID-FONDEQUIP EQM120098.

Referencias:

- [1] Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41.
- [2] Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., & Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. In *The Geology of Chile* (pp. 179–199). The Geological Society of London.
- [3] Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E. (2020). Tectonic setting of cretaceous porphyry copper deposits of northern Chile (28°–30° S) and its relations with magmatic evolution and metallogeny. *Andean Geology*, 47(3), 469–507.
- [4] Zheng, D., Wu, S., Ma, C., Xiang, L., Hou, L., Chen, A., & Hou, M. (2022). Zircon classification from cathodoluminescence images using deep learning. *Geoscience Frontiers*, 13(6), 101436.
- [5] Lee, R., Dilles, J., Tosdal, R., Wooden, J., & Mazdab, F. (2017). Magmatic evolution of granodiorite intrusions at the El Salvador porphyry copper deposit, Chile, based on trace element composition and U/Pb age of zircons. *Economic Geology*, 112(2), 245–273.
- [6] Lee, R., Byrne, K., D'Angelo, M., Hart, C., Hollings, P., Gleeson, S., & Alfaro, M. (2021). Using zircon trace element composition to assess porphyry copper potential of the Guichon Creek batholith and Highland Valley Copper deposit, south-central British Columbia. *Mineralium Deposita*, 56(2), 215–238.
- [7] Dilles, J. H., Kent, A. J. R., Wooden, J. L., Tosdal, R. M., Koleszar, A., Lee, R. G., & Farmer, L. P. (2015). Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Economic Geology*, 110(1), 241–251.

Elementos menores y traza en esfaleritas: conocimiento a partir del análisis multivariado en sistemas hidrotermales de baja temperatura

Carlos Zulueta¹, Abraham Arana¹, Eber Carbajal¹

(1) Universidad Nacional de Ingeniería, Geología, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Av. Tupac Amaru 210 - Rímac, Lima, Perú

1. Introducción

La esfalerita es un mineral hidrotermal que comúnmente se forma en condiciones epitermales en paragénesis con otros minerales de baja e intermedia sulfuración, ambientes reducidos y amplios rangos de pH (T° : 350-150; fS_2 : py-po; fO_2 : FMQ-FMQ+2; pH: 2-8); este mineral presenta la propiedad cristaloquímica de aceptar una amplia variedad de elementos en su red cristalina (e.g., Fe, Co, Cu, Mn, Se, In, Bi, Sn, Cd, Ga, Ge, Pb, Sb, Ag, As, Tl) permitiendo mostrar diferentes ensambles químicos en función a la condición fisicoquímica durante su formación. Diferentes autores han realizado estudios enfocados en el análisis geoquímico de la esfalerita. Cook et al. (2009), Ye et al. (2011) y Mishra et al. (2021) realizaron análisis estadísticos para discriminar diferentes sistemas hidrotermales a partir de las características químicas de las esfaleritas. Un análisis más detallado de la química mineral de esfaleritas fue desarrollado por Frenzel et al., (2016), donde determinaron una función mediante PCA, que permite estimar la temperatura de formación del mineral. Recientes estudios han complementado el entendimiento de los patrones químicos en las esfaleritas, donde se ha reconocido una fuerte influencia de la paragénesis asociada en el ensamble químico del mineral (Cave et al, 2020). Otros autores muestran correlaciones químicas existentes que evidencian diferentes sustituciones iónicas (Ga-Sn: As-Mn; Ge:Se:Co) producidas en el desarrollo evolutivo del fluido hidrotermal (Li et al, 2022); Torró et al (2022) observaron correlaciones específicas (Zn:Fe, In:Cu, Ga:Cu) que caracterizan sistemas VMS andinos. En el presente trabajo se analiza el comportamiento geoquímico de las esfaleritas y las posibles causas que permiten el desarrollo de sustituciones iónicas, teniendo en consideración diferentes parámetros fisicoquímicos (e.g. T° , fS , fO_2 , pH). Complementariamente, se plantea una alternativa análoga al geotermómetro de Frenzel et al (2016), que permita estimar el mismo parámetro de forma simplificada en función al Ga y Mn.

2. Geoquímica de esfaleritas

A través del análisis de los elementos menores y traza se identifican diferentes ensambles químicos como resultado del enriquecimiento o empobrecimiento de elementos; reflejando las condiciones que sufre el fluido hidrotermal. La concentración de los elementos en la esfalerita se define por la sustitución iónica con el Zn durante la evolución hidrotermal. Diversos análisis estadísticos de esfaleritas han llegado a mostrar diferentes correlaciones de elementos que siguen reacciones de sustitución que obedecen a procesos extrínsecos al mineral. Cook et al (2009) reconocen correlaciones entre In-Cu y Ag-Sn, explicados por las reacciones $Cu^{+} + In^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+} + 2Ag^{+} + Sn^{4+} \leftrightarrow 3Zn^{2+}$, sugiriendo la presencia de inclusiones de calcopirita. Li et al (2019) llegan a reconocer correlaciones semejantes entre Cu^{+}/Ag^{+} y Sn^{4+} que siguen la siguiente reacción $3Zn^{2+} \leftrightarrow 2(Cu^{+} \text{ o } Ag^{+}) + Sn^{4+}$. La paragénesis acompañante de la esfalerita es un factor crítico que evidenció Cave et al (2020), reconoce el agotamiento relativo de Bi, Tl, Ag y Sb, y lo asocia con abundante precipitación de galena, mientras que el agotamiento de Fe y Mn lo atribuye a precipitación de ferrodolomita. La influencia de la temperatura en el ordenamiento geoquímico de cualquier sistema geológico suele ser preponderante, la esfalerita no es la excepción, y más bien agrupa diversos elementos altamente sensibles a los cambios térmicos. Frenzel et al (2016) elaboran una función-geotermómetro basado en Ge, Ga, Fe, Mn, e In interpolado con datos de temperatura de homogeneización a partir de un Análisis de Componente Principal en esfaleritas.

3. Análisis geoquímico

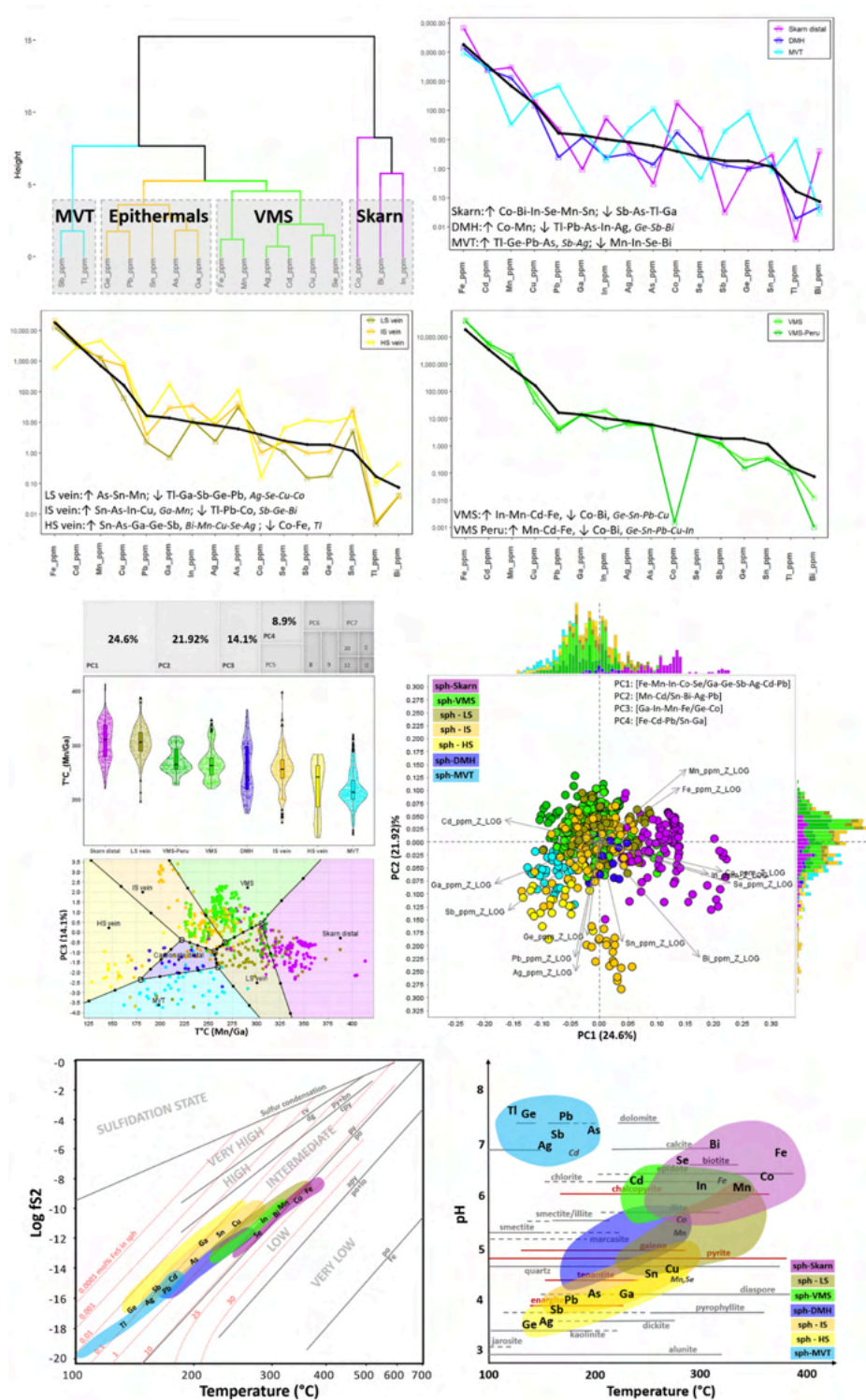
3.1. Metodología

El análisis estadístico reúne un total de 2,938 datos públicos de elementos menores y trazas (LA-ICP-MS) en esfaleritas de diferentes tipos de yacimientos Zn-Pb del mundo. Se seleccionaron elementos clave (Fe, Mn, In, Se, Co, Bi, Sn, Ge, Pb, Cd, Ga, Tl, Sb, Ag, As) con la mayor cantidad de datos según su categoría, que permitieron realizar un análisis geoquímico con una amplia variedad de elementos. Para el procesamiento, análisis exploratorio de datos y análisis multivariado de elementos se utilizaron el software ioGASTM y los paquetes 'compositions', 'NbClust' y 'ggplot 2' de R. Las herramientas de estadística multivariada que se utilizaron comprenden el Principal Component Analysis (PCA), el Discriminant Project Analysis (DPA), el M-Dist y el Cluster Jerárquico.

3.2. Resultados

3.2.1. Geotermómetro Mn/Ga

Frenzel et al (2016) identificó que los elementos Fe, Mn, In, Ga, Ge se distribuyen y concentran en la estructura de la esfalerita de forma ordenada en función a las variaciones térmicas del sistema. De forma general el vector Fe-Mn-In se asocia a esfaleritas calientes mientras que Ga-Ge a esfaleritas más frías. A partir de un análisis PCA de estos cinco elementos, definió un PC1 que mostró una correlación lineal de 0.82 con datos de temperatura de homogeneización (N=50), de esta correlación se elabora una función lineal temperatura que se conoce como el Geotermómetro GGIMFis. En el presente estudio se extendió el mismo análisis para un mayor grupo de muestras (N=70) donde el nuevo PC1 mostró una correlación de 0.75 con la temperatura de homogeneización. La distribución de los elementos sensibles a la temperatura mostraron diferentes grados de ordenamiento, donde el Mn-Ga presentaron una tendencia de agrupamiento más definida, mientras que Fe-In-Ge mostraron mayor grado de dispersión, de esta manera se decidió emplear una relación térmica entre Mn-Ga y se comparó con datos de temperatura de homogeneización, la correlación entre dichos parámetros es de 0,85, así mismo la correlación entre el Geotermómetro GGIMTis y el Geotermómetro Mn-Ga es de 0,81. De esta manera, se obtiene una función simple con alto grado de confianza y menor número de variables que permiten su uso extendido para cualquier sistema hidrotermal con información química de esfaleritas. (Geotermómetro Mn-Ga = $314,3 * \log[ZLog(Mn)+5/ZLog(Ga)+5] + 255,19$).



Dendrograma y diagramas spider de elementos menores y traza en esfaleritas. Box Plot de Geotermómetro Mn-Ga. Análisis de Componentes Principales y Discriminante M-Dist para esfaleritas por tipo de depósito. en función al Geotermómetro Mn-Ga. Diagrama Log fS₂ vs. T (°C) y pH vs. T (°C) para geoquímica de esfaleritas.

3.2.2. Análisis de Componentes Principales

En el Análisis de Componentes Principales (PCA), se evaluaron componentes principales de eigenvalue >1, los cuales alcanzaron una varianza del 70% del total de los datos. Las principales variables agrupadas mostraron vectores químicos asociados a diferentes depósitos. El PC1 [Fe-Mn-In-Co-Se/Ga-Ge-Sb-Ag-Cd-Pb; 24,6%] es un vector que caracteriza elementos de fuerte sensibilidad térmica, llegando a mostrar fuertes diferencias entre esfaleritas de skarn y esfaleritas MVT. El PC2 [Mn-Cd/Sn-Bi-Ag-Pb; 21,92%] es el vector

principal ortogonal a la dirección térmica, de tal forma que la dirección del vector maximiza la amplitud y distribución de datos ajenos al control temperatura. Este componente principal muestra claras diferencias entre esfaleritas de sistemas epitermales básicos versus ácidos (VMS-LS/IS-HS). El PC3 [Ga-In-Mn-Fe/Ge-Co; 14,1%] es un componente adecuado (ev: 1,83) para caracterizar toda la población de esfaleritas, ya que en una proyección bidimensional se muestra como un vector bisectriz entre PC1 y PC2. Este componente de forma general permite discriminar las esfaleritas de los diferentes depósitos asociados. El PC4 [Fe-Cd-Pb/Sn-Ga; 8,9%] muestra un ev: 1,17 y representa un vector de discriminación al igual que el PC3 pero con menor dominio de población de esfaleritas, este componente llega a discriminar principalmente entre esfaleritas de epitermal subacuático y subaéreo (VMS/Epitermales).

3.2.3. Dendogramas y Diagramas Spider

El agrupamiento químico de las esfaleritas se puede evaluar de forma general mediante el método 'Ward.D', el cual crea grupos donde la varianza dentro del cluster es mínima y se expresan gráficamente en un dendrograma. El primer grupo muestra una asociación de Co-Bi-In, la cual estaría representando esfaleritas tipo Skarn; un segundo grupo muestra la asociación TI-Sb, que representa esfaleritas MVT; y un tercer grupo con asociación Ge-Ga-Sn-Pb-As caracteriza esfaleritas Epitermales y la asociación Mn-Fe-Cd-Ag-Cu-Se representa esfaleritas VMS. La química de esfaleritas mostrada en los diagramas spider fueron clasificados y analizados por tipo de depósitos. Del primer grupo se seleccionaron depósitos tipo MVT, Distal Magmatic Hydrothermal-DMH y Skarn distal. Las esfaleritas MVT muestran altas anomalías de TI-Ge-Pb-As, anomalías intermedias de Sb-Ag y un empobrecimiento de Mn-In-Se-Bi. Las esfaleritas DMH presentan anomalías intermedias de Co-Mn, un empobrecimiento TI-Pb-As-In-Ag y un ligero empobrecimiento de Ge-Sb-Bi. Las esfaleritas Skarn tienen alto enriquecimiento de Co-Bi-In-Se-Mn-Sn y un empobrecimiento de Sb-As-Tk-Ga. El segundo grupo se seleccionaron depósitos epitermales (LS, IS, HS). Las esfaleritas HS muestran altas anomalías de Sn-As-Ga-Ge-Sb, anomalías intermedias de Bi-Mn-Cu-Se-Ag y un empobrecimiento de Co-Fe. Las esfaleritas IS presentan altas anomalías de Sn-As-In-Cu, anomalías intermedias de Ga-Mn, y un empobrecimiento TI-Pb-Co, acompañado de un ligero empobrecimiento de Sb-Ge-Bi. Las esfaleritas LS tienen enriquecimiento intermedio de As-Sn-Mn, un fuerte empobrecimiento de TI-Ga-Sb-Ge-Pb y un ligero empobrecimiento de Ag-Se-Cu-Co. En el agrupamiento de esfaleritas VMS del mundo y andinos, en general presentan la misma signatura, muy próxima a la composición promedio de esfaleritas; de forma general muestran un ligero enriquecimiento en Mn-Cd-Fe, un fuerte empobrecimiento en Co-Bi y un menor empobrecimiento en Ge-Sn-Pb-Cu, la diferencia principal entre los VMS andinos y VMS de mundo es el enriquecimiento de este último en In.

3.2.4. Diagrama de Clasificación de Esfaleritas

El vector PC3 es ortogonal al vector influencia térmica (PC1) y al vector influencia de acidez (PC2), por lo que puede funcionar como una dirección donde se maximizan diferencias químicas en la población de datos; pero teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos (T° , pH) en relación con el cálculo de $T^{\circ}\text{C}$ (Mn/Ga), la cual permite tener una aproximación de la temperatura de precipitación de la esfalerita, por lo que un diagrama PC3 vs $T^{\circ}\text{C}$ (Mn/Ga) puede mostrar una adecuada discriminación de poblaciones. Para identificar las diferencias químicas en esfaleritas bajo un criterio matemático, se empleó el algoritmo de Mahalanobis con dichos parámetros, de tal forma que quedaron definidos los campos de discriminación de esfaleritas en función al tipo de depósito asociado.

4. Discusión

4.1. Controles geoquímicos

4.1.1. Temperatura

El análisis PCA permite reconocer que el componente principal que ejerce mayor control en la población de datos tiene un carácter térmico. El PC1 caracteriza elementos de mayor sensibilidad a la temperatura, mostrando un ordenamiento desde esfaleritas más calientes hacia las más frías. Este hecho demuestra que el principal factor que domina las variaciones en concentraciones y ordenamiento químico en las esfaleritas es el parámetro temperatura. El enriquecimiento de Co-Bi-In-Se en las esfaleritas skarn responde a un control térmico y de la naturaleza propia del fluido. De igual manera, el enriquecimiento de As-Sb-Sn en esfaleritas HS-IS responde a un control térmico y de la naturaleza típica de fluidos epitermales.

4.1.2. Influencia de la paragénesis de la esfalerita

El mecanismo de sustitución iónica es el principal factor que restringe el ingreso o no de un átomo a la red cristalina, permitiendo el enriquecimiento de cierto elemento; de la misma manera, otros minerales co-precipitados a la esfalerita, pueden admitir con mayor facilidad otros elementos, provocando que la esfalerita presente un empobrecimiento en dicho elemento. Un ejemplo notorio es el enriquecimiento de Pb en esfaleritas de MVT, a diferencia de esfaleritas LS que están empobrecidas en dicho elemento, esto se interpreta por la mayor presencia de galena y/o sulfosales con contenido de Pb en los depósitos LS que empobrecen a la esfalerita de este elemento; mientras que en los MVT, la presencia de galena es inferior y la de sulfosales, casi nula, lo cual permite un enriquecimiento relativo, sugiriendo una sustitución simple $\text{Pb}^{2+} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+}$. Para el caso de la fuerte anomalía negativa de Co en los VMS, se interpreta que la presencia abundante de pirita-calcopirita en el ensamble, permite una fuerte incorporación de Co a su red cristalina ($\text{Co}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$), formando piritas-calcopiritas cobaltíferas usuales en ambientes VMS, dejando empobrecido en Co el fluido residual. El empobrecimiento de Co-Fe en esfaleritas HS, de Co-Pb-Tl en esfaleritas IS y de As-Tl-Ga en esfaleritas Skarn responde a co-precipitación de pirita a diferentes estadios.

4.1.3. Otros parámetros físico-químicos

Los parámetros pH, fO_2 y fS_2 son factores fundamentales en un fluido hidrotermal para determinar el intercambio iónico e incorporación de metales en la red cristalina de la esfalerita. Aunque estos parámetros fisicoquímicos no definen si cationes del fluido serán admitidos en la red cristalina de la esfalerita, sí llegan a ejercer importante influencia.

El PC2 muestra claras diferencias entre esfaleritas de sistemas epitermales básicos (VMS-LS) en contraste con esfaleritas de sistemas epitermales ácidos (IS-HS), aunque no muestra un fuerte patrón, sí es posible observar la relación y control del grado de acidez y la influencia con la distribución y concentración de elementos en la esfalerita. El control del pH, fO_2 o fS_2 se observa de forma sutil en el análisis global de diferentes tipos de esfaleritas; sin embargo, a escala de depósito, estos parámetros muestran mayor dominio en la geoquímica. Esto se puede notar analizando la secuencia paragenética completa del sistema, en relación con el tipo de esfalerita asociada a cada estadio.

4.2. Geotermómetro Mn/Ga

Elementos como Fe, Ge, Ga, Mn e In, pueden servir de indicadores térmicos en función a su distribución. Los resultados muestran un enriquecimiento en Fe para las esfaleritas de alta temperatura, favoreciendo el intercambio iónico $(Fe^{+2}, Mn^{+2}) \leftrightarrow Zn^{+2}$ típico reemplazamiento en VMS (Torro et al, 2022), lo que explica el enriquecimiento de Mn en estas esfaleritas; mientras que la reacción $(Cu^+, Ag)^+ + (Ga+As+Sb)^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ (Li et al, 2022) indica que el Ga se va a reemplazar en ambientes donde coexista Ag, As, Sb y Cu, correspondiente a una firma de baja temperatura. Tal comprensión corrobora el empleo del ratio Mn/Ga como un geotermómetro fiable para la discriminación de depósitos hidrotermales con la geoquímica de esfaleritas.

4.3. Esfalerita como herramienta exploratoria

El zonamiento químico en las esfaleritas sigue el clásico comportamiento químico de cualquier sistema hidrotermal (Fe, Co, Mn, Se, Bi, Sn, Pb, Cd, Ag, Sb, As), pero incluyendo su firma química característica (In, Tl, Te, Cd, Ga, Ge). El contenido metálico en la esfalerita va estar más controlado por la presencia de sus co-precipitados (e.g., galena, calcopirita, pirita, otros) y no necesariamente por una fuerte saturación metálica en el sistema hidrotermal. Cada tipo de esfalerita va estar influenciada químicamente por su tipo de fluido, por lo que incluso en condiciones similares va a presentar diferencias geoquímicas. El sistema mineral de esfaleritas muestra una fuerte susceptibilidad a cualquier perturbación externa, por lo que no es sencillo identificar un criterio químico de fertilidad basado solo en la química de las esfaleritas. La química mineral permite detallar características de la evolución del fluido hidrotermal o de procesos posteriores, pero no representa una fuerte herramienta exploratoria que pueda ser útil para la toma de decisiones a lo largo de la vida de un proyecto minero. Para aumentar el entendimiento geológico del sistema hidrotermal, es recomendable primero garantizar un sólido mapeo geológico, detalladas descripciones mineralógicas y un buen entendimiento de la secuencia paragenética.

5. Conclusiones

El comportamiento geoquímico en las esfaleritas sigue tres controles fundamentales: la sustitución iónica del mineral y de sus co-precipitados; la naturaleza del fluido; y las condiciones fisicoquímicas del fluido hidrotermal, donde la temperatura es el principal parámetro que ejerce control sobre la geoquímica de esfaleritas.

Del análisis PCA se tiene que: el PC1 [Fe-Mn-In-Co-Se/Ga-Ge-Sb-Ag-Cd-Pb] es un vector que caracteriza elementos de fuerte sensibilidad térmica; el PC2 [Mn-Cd/Sn-Bi-Ag-Pb] es el vector principal ortogonal a la dirección de control térmico, que muestra claras diferencias entre esfaleritas de sistemas epitermales básicos versus ácidos (VMS-LS/IS-HS); y el PC3 [Ga-In-Mn-Fe/Ge-Co] caracteriza bien toda la población de esfaleritas, ya que en una proyección bidimensional se muestra como un vector bisectriz entre PC1 y PC2.

De los diagramas spider se tiene: Skarn: $\uparrow$ Co-Bi-In-Se-Mn-Sn, $\downarrow$ Sb-As-Tl-Ga; DHM: $\uparrow$ Co-Mn $\downarrow$ Tl-Pb-As-In-Ag, Ge-Sb-Bi; LS: $\uparrow$ As-Sn-Mn, $\downarrow$ Tl-Ga-Sb-Ge-Pb, Ag-Se-Cu-Co; VMS: $\uparrow$ Mn-Cd-Fe, $\downarrow$ Co-Bi; IS: $\uparrow$ Sn-As-In-Cu, Ga-Mn, $\downarrow$ Tl-Pb-Co, Sb-Ge-Bi; HS: $\uparrow$ Sn-As-Ga-Ge-Sb, Bi-Mn-Cu-Se-Ag, $\downarrow$ Fe-Co, Tl; MVT: $\uparrow$ Tl-Ge-Pb-As, Sb-Ag $\downarrow$ Mn-In-Se-Bi.

El enriquecimiento y empobrecimiento de ciertos elementos en la esfalerita, está fuertemente influenciado por la co-precipitación de otros minerales que asimilan ciertos elementos y empobrecen el fluido residual.

El control del pH, fO_2 o fS_2 se observa de forma sutil en la química de esfaleritas (PC2; VMS-LS/IS-HS); sin embargo, a escala de depósito estos parámetros muestran mayor dominio en la geoquímica, y se puede evidenciar analizando cada estadio de esfaleritas.

Los resultados muestran que el enriquecimiento en Mn está relacionado con el reemplazamiento de Fe (alta temperatura), mientras que el Ga se va a reemplazar en ambientes donde coexista Ag, As, Sb y Cu (baja temperatura); tal comprensión corrobora el empleo del ratio Mn/Ga como un geotermómetro fiable.

Palabras Clave: Química de esfaleritas, Análisis Multivariado de esfaleritas, Geotermómetro Mn-Ga.

Referencias:

- Cave, B., Lilly, R., & Hong, W. (2020). The Effect of Co-Crystallising Sulphides and Precipitation Mechanisms on Sphalerite Geochemistry: A Case Study from the Hilton Zn-Pb (Ag) Deposit, Australia. *Minerals*, 10(9), 797.
- Cook, N., Ciobanu, C., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B., & Melcher, F. (2009). Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761-4791.
- Frenzel, M., Hirsch, T., & Gutzmer, J. (2016). Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52-78.
- Li, L., Han, R., Zhang, Y., Wu, J., & Feng, Z. (2022). Trace element signatures of sphalerite in the Sichuan Daliangzi Ge-rich Pb-Zn deposit and its implications for deep ore prospecting. *Frontiers in Earth Science*, 10, 928738.
- Mishra, B., Pati, P., Dora, M., Baswani, S., Meshram, T., Shareef, M., Pattanayak, R., Suryavanshi, H., Mishra, M., & Raza, M. (2021). Trace-element systematics and isotopic characteristics of sphalerite-pyrite from volcanogenic massive sulfide deposits of Betul belt, central Indian Tectonic Zone: Insight of ore genesis to exploration. *Ore Geology Reviews*, 134, 104149.
- Sun, G.-T., & Zhou, J.-X. (2022). Application of Machine Learning Algorithms to Classification of Pb-Zn Deposit Types Using LA-ICP-MS Data of Sphalerite. *Minerals*, 12(10), 1293.
- Torró, L., Benites, D., Vallance, J., Laurent, O., Ortiz-Benavente, B., Chelle-Michou, C., Proenza, J., & Fontboté, L. (2022). Trace element geochemistry of sphalerite and chalcopyrite in arc-hosted VMS deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 232, 106882.
- Ye, L., Cook, N., Ciobanu, C., Yiping, L., Qian, Z., Tiegeng, L., Wei, G., Yulong, Y., & Danyushevskiy, L. (2011). Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study. *Ore Geology Reviews*, 39(4), 188-217.

Control estructural del volcanismo freatomagmático y mineralización aurífera en el Proyecto Fenix Gold, Franja de Maricunga, región de Atacama

Jessica Aguilera¹, Gonzalo Galaz¹, Pamela Pérez-Flores²

(1) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Copayapu 485, Copiapó, Chile
 (2) Consultoría e Investigación Geológica Ambiental Ltda. (CIGEA Ltda)

El proyecto Fenix Gold, de la compañía minera Rio 2, está ubicado en la región de Atacama, aproximadamente a 160 km al ENE de la ciudad de Copiapó a una altura de 4.400 – 4.900 msnm. El proyecto Fenix se encuentra contenido en un sistema maar- diatrema de orientación ~NW que se desarrolló en un complejo de domos andesíticos a dacíticos del Mioceno, los cuales a su vez se encuentran emplazados al interior del volcán parcialmente erodado “Ojo de Maricunga” (Clavero & Ramírez, 2021). Este complejo forma parte de una serie de centros eruptivos entre los 26° y 28° S, en un cinturón de 200 x 500 km², de orientación ~NS, denominada Franja de Maricunga que alberga numerosos depósitos epitermales de Au-Ag (Mpodozis et al., 1995). Las estructuras regionales reconocidas en el basamento del volcán corresponden principalmente a fallas inversas de alto ángulo, rumbo ~NS y vergencia tanto al Oeste como al Este, correspondientes al Sistema de Fallas de Domeyko. Este sistema evolucionó bajo un régimen global dextral transpresional, producto de una convergencia de placas oblicua de orientación ~NE, asociada con la fase tectónica Incaica (Reutter et al., 1991). La historia cinemática de este sistema de fallas es compleja, con evidencias de fallamiento principal NS de rumbo dextral y de un periodo de inversión tectónica, donde algunas de estas estructuras experimentaron un posterior desplazamiento sinistral.

Basado en el análisis estadístico de datos de fallas, diques de inyección y vetillas mineralizadas con Au de tipo “black banded veins o BBV” [1] (Lohmeier, 2017), de acuerdo a la metodología utilizada por Marrett y Allmendinger (1990), se propone un *modelo geológico – estructural* acerca del control del volcanismo freatomagmático y la mineralización del proyecto Fenix. El modelo responde al criterio de deformación de Riedel (1929), compatible con un campo de esfuerzos regional σ_1 ~NE-SW (Somoza & Ghidella, 2005), generando el desarrollo de (i) fallas principales con orientación ~N-S, (ii) fallas normal – dextral con orientación N10°W (estructura P de Riedel) y vetillas mineralizadas BBV emplazadas por estas estructuras, (iii) fallas con orientación N13°E y diques de inyección, (iv) fallas normales con orientación N47°E, (v) falla sinistral y normal - sinistral (estructura P') con orientación N65°W y vetillas mineralizadas BBV emplazadas por estas estructuras, (vi) falla sinistral y normal – sinistral (estructura R') con orientación N75°E y vetillas mineralizadas BBV emplazadas por estas estructuras.

Según los resultados del análisis cinemático y dinámico a escala local en este estudio, se registra un tensor de esfuerzos con un σ_1 en una posición subvertical y un σ_3 orientado ~NE-SW, los cuales generan reactivaciones en las estructuras preexistentes y nuevas estructuras tensionales de orientación ~NW. Se desconoce el motivo de esta variación temporal del régimen global de esfuerzos, no obstante, es posible que se encuentre asociado a un breve periodo de desacople en el proceso de subducción (e.g. Scheuber & González, 1999) o a periodos de relajación cortical, que coinciden con cambios en el régimen tectónico hacia condiciones extensionales, en donde se han identificado fallas normales lítricas que afectan a las ignimbritas de 15 Ma ubicadas en la zona sur de la Franja de Maricunga. Además, se ha reportado evidencia geoquímica entre los 16 a 12 Ma, en particular, se observa una disminución en las pendientes de patrones de Tierras Raras, específicamente en los valores de La/Yb y Sm/Yb. Esta disminución indica un retorno hacia magmas evolucionando en condiciones de presión intermedia (Mpodozis et al., 1995).

[1] Vetillas de cuarzo con bandas externas oscuras debido a diversas inclusiones de opacos, en donde el oro se presenta como aleación en diminutos cristales de magnetita.

Palabras Clave: Franja Maricunga, estructura, modelo de Riedel, desacople, vetillas mineralizadas BBV.

Agradecimientos: Agradecemos a Fénix Gold Ltda. por el financiamiento y al equipo de exploraciones por su valioso apoyo. Especialmente a la Dra. Pamela Pérez Flores por su colaboración incondicional.

Referencias:

- Clavero, J. & Ramírez, V. 2021. Reporte Interno. Análisis de facies volcánicas proyecto Fénix, región de Atacama. Amawta Consultores Ltda.
- Lohmeier, S. 2017. The Cerro Maricunga Gold Deposit, Maricunga Belt, Northern Chile: Magmatic Evolution and Au Mineralization. Dissertation. Technical University of Clausthal, pp. 283.
- Marrett, R., & Allmendinger, R.W. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology* 12, 973-986.
- Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S. M., & Tittler, A. 1995. La Franja de Maricunga: síntesis de la evolución del Frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. *Andean Geology*, 22 (2), 273-313.
- Reutter, KJ, Scheuber, E. & Helmcke, D. 1991. Structural evidence of orogen-parallel strike slip displacements in the Precordillera of Northend Chile. *Geologische Rundschau*, 80, 135-153.
- Riedel, W. 1929. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. - *Zentralblatt fuer Mineralogie, Geologie und Palaeontologie Stuttgart*. 354-368.
- Somoza, R., & Ghidella, M. E. 2005. Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (4), 797-809.
- Scheuber, E., & González, G. 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18 (5), 895-910.

Flujo de calor y flujo difuso de CO₂ que indican conductos permeables en el sistema hidrotermal del Cordón Caulle, Chile

Pablo Becerra¹, Pablo Sánchez-Alfaro²⁻³, Daniele Tardani⁴, Felipe Aron⁵⁻⁶, Pamela Perez-Flores⁷, Carolina Muñoz-Saez⁸

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(3) Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, Santiago, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(5) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotecnia, Santiago, Chile

(6) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, Santiago, Chile.

(7) Consultoría e Investigación Geológico Ambiental Ltda., Huasco, Chile

(8) University of Nevada, Nevada Bureau of Mines and Geology, Reno, USA

La distribución espacial de conductos permeables en manifestaciones superficiales de sistemas geotermales activos es un aspecto clave para entender a dinámica de los sistemas hidrotermales. El complejo volcánico Puyehue – Cordón Caulle (CVPCC) hospeda uno de los mayores sistemas geotermales activos de la zona volcánica sur de Los Andes. Este consta de una depresión volcano-tectónica de orientación NW, cuyas principales manifestaciones termales son campos fumarólicos y surgencias de agua. Estas manifestaciones se encuentran espacialmente alineadas en una tendencia NW, cercanas a los bordes de la depresión, sugiriendo que el principal control geológico a escala regional en la permeabilidad está asociado a dichas estructuras. A pesar de lo anterior, los controles geológicos de escala local en la permeabilidad no están claros. En este trabajo estudiamos la distribución espacial de escala local de la temperatura superficial, el flujo de calor y flujo de CO₂ difuso en el campo fumarólico de Los Venados. La temperatura superficial del suelo fue obtenida utilizando imágenes termales de alta resolución (15 cm/pixel), obtenidas a partir de levantamientos fotogramétricos utilizando un dron con cámara termal (Mavic 2 Enterprise Advanced), de las cuales, analizamos la disposición espacial de las principales anomalías termales. El flujo de calor fue calculado a partir de las mediciones del gradiente termal en 1 m de profundidad, utilizando 10 termistores dispuestos cada 10 cm y midiendo la conductividad térmica del suelo con un equipo analizador de propiedades térmicas (KD2 Pro Thermal Properties Analyzer). El flujo de CO₂ difuso fue calculado utilizando el método de cámara de acumulación de CO₂ en una grilla detallada de puntos. Resultados preliminares indican una fuerte relación de la distribución espacial de las anomalías termales, flujo de calor y flujo de CO₂ difuso, con lineamientos paralelos a estructuras definidas a partir de estudios estructurales de detalle realizados en los alrededores del campo fumarólico. Estos resultados indican la relevancia del rol que juegan las estructuras como conductos permeables que facilitan la migración vertical de fluidos y calor en un sistema geotermal activo no sólo a nivel regional, sino que también, a nivel local.

Palabras Clave: Imágenes termales, Cordón Caulle, UAV, CO₂, Flujo de Calor.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT Regular 1201219.

Control estructural multi-escala en depósitos IOCG Cretácicos del Distrito de Canela, Región de Coquimbo, Chile

Matías Calquín Catalán¹, Gisella Palma Lira², Sebastián Perroud Rainone¹⁻³, Guillermo Fuentes Espinoza¹⁻³

(1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Ejército Libertador 145, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Chile

(3) TECT Geological Consulting, Santiago de Chile

Una de las franjas metalogénicas más prospectivas a nivel nacional e internacional corresponde a la franja metalogénica del Cretácico Inferior, la cual alberga variados tipos de depósitos metalíferos en Chile, tales como, magnetita – apatita o *Iron Oxide Apatite* (IOA), estratoligados de Cu-Ag, óxidos de hierro-cobre-oro o *Iron Oxide Copper Gold* (IOCG) y pórfidos cupríferos. Dentro de esta franja, el Distrito de Canela, ubicado en la Región de Coquimbo, cuenta con varias labores mineras que se caracterizan por la explotación de Cu y Au a escala artesanal. Hasta la fecha, la información sobre esta área es escasa, lo que limita el entendimiento del control estructural de la mineralización y su relación con la génesis de los depósitos minerales. El estudio se centra en las minas Copao, Yeku y Milo, correspondientes a depósitos del tipo IOCG. Se recopiló información geológica regional y de los depósitos estudiados, se realizó mapeo geológico a diferentes escalas y se recolectaron datos geofísicos utilizando el método del campo eléctrico natural con el instrumento PQTW-500. Los depósitos estudiados se encuentran en diferentes litologías, donde, la mina Copao se hospeda en secuencias de rocas volcánicas de la Formación Arqueros, mientras que las minas Yeku y Milo se encuentran hospedadas en rocas dioríticas a granodioríticas del Cretácico. Estos últimos depósitos constituyen un caso particular, ya que la mayoría de los depósitos IOCG se encuentran emplazados en rocas volcánicas a volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico inferior. Las vetas mineralizadas presentan rumbos preferenciales NO, NNO y NS, con manteos entre los 40° a 70° y sub-verticales, con potencias que varían de 1 a 2 m, y de menor tamaño. Las vetas presentan mineralización de calcopirita asociadas con abundante hematita (especularita), además de mineralización oxidada de crisocola, malaquita, azurita y arcillas de apariencia auríferas. Las vetas de orientación NS se relacionarían a sistemas tempranos de fallas normales, así como sinestrales a transtensionales de la misma orientación, asociadas al Sistema de Fallas de Atacama. Por otra parte, el control estructural de la mineralización regional se relacionaría a estructuras de basamento o trans-litosféricas, las cuales se proyectan en superficie con orientaciones NO a NNO, lo que se evidencia localmente por la disposición de vetas en el sector, correspondientes a vetas de extensión comprobadas por su morfología vista en terreno y en los perfiles geofísicos del área de estudio. Estos habrían sido los principales canales que habrían facilitado el ascenso de fluidos magmáticos-hidrotermales que formaron los depósitos IOCG Copao, Yeku y Milo durante distintos eventos de alteración y mineralización del Cretácico.

Palabras Clave: Trans-litosféricas.

Variabilidad espaciotemporal de productos magmáticos y volcánicos asociada a cambios en el marco tectono-estructural: un caso de estudio en la Cordillera Principal de la Región del Maule, Chile

Tomás Fischer¹, José Piquer Romo¹, Gâelle Plissart¹, Francisco Torres Fuenzalida¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Avenida Eduardo Morales Miranda Edificio Emilio Pugin, Valdivia, Chile

En contextos de subducción, el tipo de productos magmáticos que alcanzan la corteza superior, y eventualmente la superficie mediante volcanismo, dependen de múltiples factores, dentro de los cuales destacan el régimen tectónico regional y la orientación de conductos magmáticos en relación al tensor de esfuerzo dominante. Para un mejor entendimiento de la relación entre estas variables, se llevó a cabo un estudio geológico-estructural de detalle en la vertiente occidental de la Cordillera Principal del Maule, sector laguna La Invernada, donde el magmatismo asociado a la subducción ha estado activo al menos durante los últimos 18 Ma y donde se sitúa una serie de cuerpos intrusivos mio-pliocenos y centros volcánicos cuaternarios (Complejo Volcánico Descabezado Grande), cuya asociación en el contexto tectono-estructural no ha sido precisada hasta el momento.

Se determinó la relación entre los sistemas de falla de alto ángulo y las unidades magmáticas mapeadas, junto con la variación espacio-temporal de los tensores de esfuerzo registrados sobre estos intrusivos y sus rocas de caja. Sumado a ello, se utilizó la geoquímica de diferentes productos magmáticos para evaluar su fertilidad, entendiéndose ésta como el potencial para formar grandes depósitos minerales tipo pórfido. También se precisó la edad de distintas unidades geológicas mediante nuevas dataciones U-Pb en zircones, lo que complementa previos estudios geocronológicos realizados en la zona.

Se reportaron tres sistemas de falla principales con distintas características: estructuras de rumbo ~WNW – NW están relacionadas fundamentalmente al emplazamiento de intrusivos, mientras que fallas de rumbo ~NE – ENE y ~NNE más paralelas a la orientación del σ_1 regional, instaurado a partir del Mioceno medio, se asocian a enjambres de diques y lineamientos volcánicos. En cuanto a la caracterización geoquímica del magmatismo, por una parte se observa un aumento en la pendiente de los patrones de REE y mayores índices de fertilidad y engrosamiento cortical durante la cristalización de las distintas facies del Complejo Plutónico La Invernada (~15 – 14 Ma), lo cual coincide con un evento orogénico descrito en el mioceno Medio a esta latitud en trabajos previos. Por otra parte, los intrusivos pliocenos de La Resolana exhiben mayores índices de fertilidad magmática; no obstante, estos siguen siendo considerablemente menores que los asociados a magmas formadores de pórfidos de cobre descritos para la misma región (prospecto Brahma). De lo anterior, se concluye que las diferencias en señales de fertilidad observadas en intrusiones contemporáneas y emplazadas bajo un mismo contexto tectónico regional no pueden ser explicadas por dichos procesos de escala continental, por lo que mas bien deben estar relacionadas a particularidades locales, como por ejemplo lo son las discontinuidades corticales de ascenso magmático. En cuanto a estas estructuras, los sistemas de falla que presentan rumbos desfavorables respecto a la orientación de σ_1 aparentemente favorecen tiempos de residencia magmática más largos, logrando mayores grados de diferenciación y fertilidad en la corteza superior, mientras que los magmas que ascienden a través de fallas con una orientación más favorable usualmente son menos diferenciados (incluso primitivos), y tienden a alcanzar la superficie formando estratovolcanes y lineamientos de centros eruptivos monogenéticos.

Palabras Clave: magmatismo, control estructural, corteza cortical, fertilidad.

Financiamiento: Trabajos de terreno y análisis de laboratorio financiados por el proyecto Fondecyt de Iniciación en Investigación No. 11181048 (ANID, Chile), cuyo investigador responsable es el Dr. José Piquer.

Agradecimientos: A Carlos Venegas, por su contribución en las discusiones y por su apoyo logístico desde el SERNAGEOMIN durante una salida a terreno. A la familia Torres por su apoyo y alojamiento en la región del Maule.

Referencias:

- Astaburuaga, D. (2014). Evolución estructural del límite Mesozoico-Cenozoico de la Cordillera Principal entre 35°30' y 36°S, región del Maule, Chile. Undergraduate thesis. Santiago: Universidad de Chile.
- Chiaradia, M. (2015). Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: An Earth scale perspective. *Sci. Rep.* 5, 8115.
- Contreras, M. A. (2019) Estudio tefroestratigráfico de los depósitos proximales de los conos piroclásticos "Los Hornitos", Región del Maule, Chile. Undergraduate thesis. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Díaz, V., Muñoz-Gómez, M., Deckart, K., Townley, B., Mathur, R., and Martínez, O. (2020). The Miocene Brahma porphyry Cu-Mo prospect in central Chilean Andes (35°45'S): Geology, geochronology (U-Pb, Re-Os) and geochemistry. *Ore Geol. Rev.* 122, 103522.
- Drake, R. E. (1976). Chronology of cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes-latitudes 35°30' to 36°S. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1, 265–284.
- Giambiagi, L., Mescua, J., Bechis, F., Tassara, A., and Hoke, G. (2012). Thrust belts of the southern Central Andes: Along-strike variations in shortening, topography, crustal geometry, and denudation. *Geol. Soc. Am. Bull.* 124, 1339–1351.
- González, O., y Vergara, M. (1962). "Reconocimiento Geológico de la cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38°S," in Publicaciones del Instituto de Geología de la Universidad de Chile 24, 19–121.
- Piquer, J., Sánchez-Alfaro, P., and Pérez-Flores, P. (2021). A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation. *Geology* 49, 597–601.
- Salas, P., Rabbia, O., Hernández, L., and Ruprecht, P. (2017). Mafic monogenetic vents at the Descabezado Grande volcanic field (35.5°S–70.8°W): The northernmost evidence of regional primitive volcanism in the southern volcanic zone of Chile. *Int. J. Earth Sci.* 106, 1107–1121.

Controles estructurales y litológicos en la formación de depósitos cupríferos en el distrito minero de Til-Til, Chile Central

Lesly Herrera Gómez¹, Sebastián Perroud², Guillermo Fuentes²

(1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Av. Ejército Libertador 145, Santiago, Chile

(2) TECT Geological Consulting, Santiago, Chile

Comprender cómo se formaron los depósitos minerales de un sector y cuáles fueron los controles principales se convierte en un conocimiento fundamental para potenciar futuras exploraciones en un distrito poco conocido (Municipalidad de Til-Til, 2015). Uno de estos, es el distrito minero de Til-Til, al norte de la Región Metropolitana (~33°05'S), históricamente conocido por la explotación de cobre y oro, asociada a depósitos con estilos de mineralización del tipo estratoligado, y vetas (CIREN, 2016), pertenecientes a la franja metalogénica del Cretácico. El más importante de estos es la mina cuprífera El Olivo, que produce a alrededor de 7.000 ton mensuales de roca con leyes de @Cu 1% (Arriagada, 2022). Adicionalmente, en este distrito minero se pueden encontrar minas artesanales de cobre y oro, las cuales presentan marcadas diferencias en sus estilos de mineralización dependiendo del metal extraído. Acorde a esto, en el presente trabajo se estudiaron dos minas cupríferas artesanales, Santa Matilde y Lophan Norte, las cuales se compararon con información disponible de otras minas aledañas, con el fin de comprender cuáles son los controles regionales y locales de la mineralización cuprífera en la zona. Para esto, se realizaron mapas geológicos locales y regionales en terreno, con apoyo de fotointerpretación satelital. Se analizaron las características estructurales de la mineralización y las paragénesis minerales mediante cortes transparentes y muestra de mano. La mineralización aurífera, concentrada en el sector norte de la zona de estudio, tiende a presentarse diseminada en vetas cuarcíferas subverticales, a diferencia de la mineralización cuprífera, concentrada en el sector sur, que está compuesta por sulfuros primarios como calcopirita y bornita y se presenta en vetas de apertura y mantos cupríferos, con halos de alteración propilítica pervasiva. Las vetas y fallas se asocian, en primera instancia, a fallas con cinemática normal, en donde la mineralización se concentra en las zonas de daño de estructuras mayores, afectadas posteriormente por fallas de rumbo que dislocan las vetas sinistralmente, con orientaciones NS y NW, respectivamente y en segundo orden a vetas de aperturas generadas por fallas locales normales con orientación NW-NS, respectivamente. Las estructuras, tanto en el sector más aurífero del norte, como el sector más cuprífero al sur, muestran actitudes estructurales similares, no obstante, el estilo de mineralización es distinto. Con esto, nuestros resultados indican que las diferencias litológicas en la roca caja son un factor primario en el control de la mineralización, en donde los depósitos principalmente auríferos se hospedan en rocas intrusivas relativas al Plutón Caleu, mientras que los depósitos cupríferos tienden a estar hospedadas en andesitas y andesitas ocoitas de la Formación Veta Negra, lo que nos permite inferir que los controles estructurales regionales de la mineralización pudieron ser similares, sin embargo, la competencia y resistencia de la roca caja a la deformación, determina las principales diferencias en los estilos de mineralización presentes en el distrito.

Palabras Clave: depósitos minerales, estilos de mineralización, controles estructurales, distrito minero tiltil.

Referencias:

- Arriagada, G. (2022). Petrografía y Mineralogía de Mina el Olivo, Distrito Minero de Til-Til, Región Metropolitana: implicancias en su modelo genético.
- CIREN. (2016). región metropolitana, provincia de Chacabuco comuna de Til-Til, recursos naturales y proyectos. En Ciren, & Structural, región metropolitana, provincia de Chacabuco comuna de Til-Til, recursos naturales y proyectos.
- Municipalidad de Til-Til, S. R. (2015). La minería en la Región Metropolitana.

Nature of the physical processes in the generation of vein haloes in fault-vein systems: implications for hydrothermal systems

Karin Hofer-Apostolidis¹, José Cembrano¹, John Browning¹, Pamela Pérez-Flores¹, Thomas Mitchell², Philip Meredith²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería y Construcción Civil, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) University College London, Department of Earth Sciences, 5 Gower Place, London, UK

Understanding the key fundamental physical processes that control the generation of vein haloes in fault-vein systems is valuable for comprehending a wide range of geological processes. In particular, the formation of hydrothermal ore deposits, where hot aqueous fluids interact with the wallrock. Understanding how fluids flow forming halo-type veins is essential to assess the potential of higher-grade zones within a hydrothermal ore system. Haloes exhibit evidence of the passage of externally derived fluids through rock fractures and mass transfer processes from the wallrock into preexisting or newly formed discontinuities at scales from millimeters to kilometers. Furthermore, haloes have been regarded as mimicking damage zones accompanying quasi static or dynamic fracture propagation (e.g. Faulkner et al. 2011). This, in turn, has allowed the finding of scaling relations between halo width and fault displacement, raising questions on the nature of fault propagation in the crust.

In this work, we examine the geometry, composition, and contact relationships between veins and the wallrock, which include halo development (e.g. Vermilye and Scholz 1994). To do this, we selected well-exposed field examples of fault-vein networks, developed on granitic and volcanic rocks. Vein length and width and halo width were measured directly in single veins, both at the outcrop and under the optical microscope. We also performed qualitative textural analyses of the distribution and morphology of the various haloes. We also conducted SEM analysis to determine element distributions within and around the haloes. By measuring these parameters, we hope to be able to establish the scaling relationships between halo width and vein width and provide information on the main variables controlling the nature of fluid-rock interaction. For instance, we hypothesize that the halo width to vein width ratio is related, at least in part, to the mechanism by which the halo is generated. I.e., whether the halo formed by elements transferred from the vein fluid to the wallrock or vice versa. The different wallrock types and vein infills observed allow the quantification of elements gains and losses during vein and halo formation by analyzing mobile and immobile element concentration ratios in the altered and unaltered wallrock.

We identify and look into veins and halos formed as extensional, extensional-shear, and shear fractures in the different host rocks. In particular, we are currently analyzing twenty samples from IOCG mineral deposits in the Atacama Desert, many of which contain multiple sets of veins. To strengthen our database, we also analyzed vein samples from granites of the Cathaysia tectonic block in southeast China. These samples exhibit epidote-dominated veins within a coarse-grained granodioritic host rock. In this case, halo-wallrock contacts are diffuse, and the veins are generally thinner than those of quartz-dominated veins emplaced within fine-grained altered andesite and diorite from Atacama. These veins show sharp halo contacts with the surrounding host rock and display a roughly linear relation between the size of halo widths and vein widths.

Halo-width to vein-width ratios and associated scaling have potential implications on a more reliable estimation of ore grade variations away from high-grade mineralized veins to the relatively lower grade surrounding wallrock volumes. For instance, observations of veinlets and haloes at the mesoscopic scale could be upscaled to district scales, especially where there is no complete exposure of the ore deposit.

Keywords: Vein, Halo, Scaling, Wallrock-fluid interaction, Ore deposit.

Financing: Proyecto FONDECYT # 1210591. Investigador responsable: José Cembrano.

Acknowledgments: FONDECYT Project #1210591 funded this study. F. Saez and J. Ruz provided useful insights into the problem, and Jim Davy helped with sample preparation at UCL.

References:

- Faulkner, D.R., Mitchell, T.M., Jensen, E., Cembrano, J. (2011). Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. *J. Geophys. Res.* 116. B05403.
- Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1995). Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology*, 17(3), 423–434.

The Ciclon-Exploradora Breccia-Vein-Fault Epithermal Deposit: An Eocene Cordilleran-type mineralization in a transpressional deformation regime in the Domeyko Range, Northern Chile

Martin Marquardt², Pamela Pérez-Flores¹, José Ponce², Eduardo Esparza², Cristian Munchmeyer²

(1) CIGEA Ltda., Departamento de Investigación, Manuel Rojas 23, Terrazas de Amancay, Huasco, Chile
(2) Minería Activa SPA, Departamento de Investigación, Av. Presidente Riesco 5335 Of. 2104, Santiago, Chile

Epithermal polymetallic Cu-Ag-Zn-Pb-Au mineralization took place within the Eocene Exploradora Copper Porphyry District located in the Domeyko Range, 65 km northeast from El Salvador Porphyry Copper Mine. Polymetallic ore production has been discontinuously explored and exploited since the mid-19th century, which includes Ciclon, Exploradora and San Carlos mines.

The Eocene district is composed of folded Triassic and Jurassic calcareous sedimentary units intruded by dioritic to monzodioritic rocks of the Exploradora Intrusive Complex, including several centers of quartz dioritic to granodioritic/dacitic composition porphyries, mostly emplaced along NNE to NE-oriented corridors. This syntectonic complex was mainly emplaced along the Sierra Castillo Fault System, which is part of the margin-parallel Domeyko Fault System, active during the Eocene Oligocene as a compressional to transpressional intra-arc system. This fault system together with NE- and NW-striking transverse faults, were active in the same period and played a key role in the emplacement of magmatism and mineralization at the district.

The main magmatic phases of the Exploradora Complex, with outcrops between 3,200 to 4,000 m.a.s.l. records different alteration and exposure levels, geochemistry and geochronological ages suggesting at least four discrete pulses during 4 m.y.: 1) Early complex of dioritic to monzodioritic intrusions (38-36 Ma), with Ca (K) alteration, spatially associated with Zn and Fe exoskarn mineralization; 2) Dacitic to rhyolitic porphyries and aplitic rocks (ca. 36 Ma) intruded earlier pulses, with potassic, propylitic and argillic alteration and copper anomalies; 3) Quartz Monzodioritic Porphyry (ca. 35 Ma) exposed potassic alteration (biotite-magnetite plus albite) and related Au-Cu mineralization; 4) CODELCO's Exploradora Cu-Mo dacitic and dioritic porphyries, HS-veins and post-mineral Diatreme (35-34 Ma).

After ca. 35 Ma magmatic pulse, polymetallic epithermal mineralization was developed mainly at the western part of the district and close to some discrete porphyry centers. NS- and NNW-striking sinistral faults, extensional vein-breccia-faults, and carbonate replacement ore bodies were emplaced mainly in sedimentary host rocks or near intrusion contacts. The structural level of exposure of the plutonic rocks and epithermal mineralization suggests that over a 4 m.y. period the whole district was exhumed probably between 3 to 6 kilometers.

Polymetallic mineralization shows a consistent evolution from low sulfidation conditions to intermediate sulphidation assemblages. A first stage is characterized by the presence of magnetite, pyrrhotite, Fe-rich sphalerite, clearly observed specially at Ciclón ore body, which was developed in the contact between skarnified carbonatic sedimentary and intrusive rocks (garnet-pyroxene-wollastonite-scapolite skarn zoning). At Exploradora, skarn facies are less-well developed and the epithermal ore body was developed mostly over monzodiorites and diorites. The second polymetallic stage in its early phase develops chlorite-pyrite veinlets that may or may not contain quartz, followed by a massive pyrite mineralization that generally forms euhedral crystals.

The final phase of this event is given by quartz – chalcopyrite ($\pm$ chlorite - sericite –pyrite) and lower contents of Ag-bearing sulfosalts. The third stage is recognized in veins emplaced both in intrusive rocks and in sedimentary rocks where it also forms replacements along lithological contacts. It consists of Fe-poor sphalerite, galena, Fe-Mn-Ca-Mg-Zn carbonates, minor amounts of chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite, and other Ag sulfosalt minerals. Gold is seen at small free particles and spectrum. Main alteration minerals are quartz-kaolinite and minor amounts of sericite, and at last Calcite $\pm$ arsenopyrite veinlets crosscutting the mineral assemblages of the previous stages. This evolution is similar to the one observed in several epithermal porphyry-related polymetallic ("Cordilleran") deposits, e.g., Cerro de Pasco (Rottier et al., 2018)

Keywords: Epithermal polymetallic, transpression, strike-slip, Domeyko fault, porphyry-related deposit.

Sistemas Estructurales Litosféricos y control de la Metalogénesis Andina: ¿Lineamientos sobre-interpretados o estructuras reales?

Isaac Navarro Carriel¹, Daniel Carrizo Santiago², Osvaldo Rabbia⁴, Andrés Tassara Oddo¹, Javier Fuentes Sepúlveda³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Bío Bío, Concepción, Chile

(2) GeoEkun SpA, Providencia, Chile

(3) Consultor Independiente, Chile

(4) Universidad de Concepción, Instituto Geología Económica Aplicada (GEA), Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

El margen occidental de los Andes Centrales hospeda los arcos magmáticos con mayor contenido de cobre a escala global. La creciente demanda mundial de metales le confiere a esta provincia metalogénica una relevancia estratégica. Sin embargo, luego de décadas de exploración, usando nueva tecnología, el incremento de recursos metálicos mediante nuevos descubrimientos, no ha sido del todo exitoso. En este contexto, la exploración minera requiere urgentemente nuevas estrategias basadas en la renovación de los paradigmas de conceptualización geológica, que favorezcan la actualización de las prácticas tradicionales de exploración, permitiendo incrementar su tasa de éxito y así poder revertir el déficit mundial de metales proyectado para las próximas décadas (Schipper, 2018).

En el margen oriental de los Andes Centrales se han propuesto estructuras de escala litosférica (Salfity, 1985) que, proyectadas en el margen Andino occidental, tendrían una correlación espacial positiva con conocidos distritos minerales (Richards, 2000), tal como ha sido documentado en otras regiones como Australia, Nueva Guinea y Norteamérica (p.ej. O'Driscoll, 1986; Hill *et al.*, 2002). Sin embargo, la pobre expresión que estos rasgos estructurales litosféricos tienen en la cobertura meso-cenozoica dificulta notoriamente su cartografía (Carrizo & Fuentes, 2019; Fuentes, 2020; Navarro *et al.*, 2021), incrementando la incertidumbre en su definición e interpretación. Esto ha obstaculizado el uso de este valioso concepto en la actual prospección en los Andes.

La cartografía de lineamientos estructurales sobre imágenes y tomografías es una práctica habitual en exploración. Esta tarea conlleva una gran incertidumbre sujeta a un grado de interpretación, en muchos casos forzada, y no siempre declarada, lo que puede ocasionar desviaciones importantes cuando los equipos de exploración desarrollan campañas de sondeos y mapeo de superficie, lo que se traduce en una pérdida de fiabilidad del uso de esta herramienta cartográfica. Por otra parte, las estrategias para demostrar la existencia de estructuras litosféricas mediante la búsqueda de fallas discretas exponen problemas de escala no considerados, limitando el avance en la documentación de dichos sistemas estructurales.

Este estudio presenta una metodología determinística para la definición de zonas estructurales de escala cortical aplicadas al margen occidental de los Andes Centrales entre los 17,5° y 34,5° LS. Esta metodología considera el desarrollo de una cartografía estructural sintética basada en mapas a escala 1:100.000 del Plan Nacional de Geología. Esto permitió construir una base de datos con 30.144 estructuras, las cuales se validaron y ajustaron con el modelo de elevación digital ALOS-PALSAR. Los datos se sometieron a un análisis geométrico que permitió definir tres familias estructurales principales: N-S, NE-SW y NW-SE. Con los datos asociados a cada familia, se realizó una interpolación para construir mapas de calor que reflejen la densidad espacial de las estructuras y permitan identificar cuantitativamente las zonas estructurales mayores, representadas como sectores con mayores concentraciones de datos.

El análisis geométrico refleja que la orientación preferencial de las grandes estructuras es paralela a la Fosa, evidenciando el control de la subducción en el desarrollo estructural del margen oeste de los Andes Centrales. Mediante el uso de una base de datos de depósitos de Cu y Au recientemente compilada (Rabbia, inédito), se correlacionaron las zonas estructurales cartografiadas con los depósitos minerales andinos. Los resultados muestran que la proyección de las zonas estructurales NE - SW contienen el 75,5% de los depósitos de Cu y el 70% de los depósitos de Au. Adicionalmente, se reconoce cuantitativamente una relación espacial positiva entre los depósitos de Cu de clase mundial y regiones de interferencia estructural entre las tres zonas estructurales definidas. A pesar de constituir una singularidad geográfica, estas regiones contienen el 83,8% del tonelaje de Cu total de la base de datos.

Se propone que la distribución espacial de los principales escenarios metalogénicos de los Andes Centrales responde a un control estructural de primer orden gobernado por la interferencia entre las principales estructuras andinas (N-S, NE-SW y NW-SE). Las zonas estructurales pre-andinas, oblicuas al orógeno, condicionarían la continuidad de los depósitos.

Los resultados aquí presentados constituyen un aporte a la comprensión de los procesos metalogénicos andinos y se exponen como una alternativa para el desarrollo de nuevos conceptos de exploración greenfield que esperamos sean una contribución para afrontar la inminente necesidad de aumentar los inventarios metálicos globales.

Palabras Clave: Interacción Estructural, Base de datos Estructural 1:100.000, Estructuras litosféricas pre-andinas, Sistemas estructurales Andinos, Depósitos Minerales.

Referencias:

- Carrizo, D. & Fuentes, J. (2019). The role of the interplay between deep and shallow crustal structures in the metallogenic architecture of Central Andes: renewing the paradigm. In Libro de Actas ISAG, Ecuador.
- Fuentes, J. (2020). Metalogénesis de los sistemas porfíricos cretácicos (25° - 31°S): implicancias para la exploración minera. Tesis para optar al grado de Magíster en Geología Económica (Inédito). Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas: 319 p. Antofagasta.
- Hill, K., Kendrick, R., Crowhurst, P., & Gow, P. (2002). Copper-gold mineralisation in New Guinea: Tectonics, lineaments, thermochronology and structure. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49(4), 737-752.
- Navarro, I., Carrizo, D., & Fuentes, J. (2021) Potencial mecanismo de reactivación de estructuras litosféricas críticas para el desarrollo de provincias metalogénicas diacrónicas en los Andes Centrales. In Publicación Especial N°15 - XX Congreso Peruano de Geología, Perú (pp. 402-407).
- Navarro, I. (2023) Interacción entre estructuras litosféricas pre-andinas y sistemas estructurales Andinos en la metalogénesis de los Andes Centrales. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 140 pp.
- O'Driscoll, E. (1986). Observations of the lineament-ore relation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 317(1539), 195-218.
- Richards, J. P. (2000). Lineaments revisited. *SEG Discovery*, (42), 1-20.
- Salfity, J. (1985). Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste Argentino. In IV Congreso Geológico Chileno, vol 2 (pp. 119-137): Universidad del Norte.
- Schipper, B. W., Lin, H.C., Meloni, M. A., Wansleben, K., Heijungs, R., & Van Der Voet, E. (2018). Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 28-36

Predicting the attitude of dike and veins, through probabilistic modeling of principal stresses

Nicolás Pérez Estay¹, Javiera Ruz-Ginouves²⁻³, Pamela Pérez-Flores⁴, Gerd Sielfeld⁵⁻⁶, Tomás Roquer⁷, José Cembrano¹⁻³

(1) Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA) - University of Chile, Santiago, Chile. (*corresponding author: nnperez@uc.cl)

(2) Geology Department, University of Otago, Dunedin, New Zealand

(3) Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

(4) Consultoría e Investigación Geológica Ambiental Ltda., Huasco, Chile.

(5) Cirrus SpA, Chile.

(6) School of Environment, University of Auckland, New Zealand

(7) Departamento de Ingeniería de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Extension fractures such as dikes and veins reveal the spatial distribution of magmatic and hydrothermal flow within the crust, which is vital for assessing volcanic hazards and hydrothermal resource exploration. Therefore, the relationship between extension fractures and principal stress has constituted a topic open for debate, in particular, when the aim is predicting and defining the attitude (strike and dip) of dikes and veins.

In this work we conducted a mechanical modeling to predict the possible orientations of extension fractures and applied these models to the Andean Southern Volcanic Zone (SVZ, 33°-46°S). Three assumptions were taken into account: (i) the vertical stress " σ_v " is equal to the lithostatic pressure; (ii) the differential stress " τ " is unknown but should vary between 1 and 250 MPa; and (iii) the orientation of the principal stress axes ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) and the stress ratio (Φ) can be calculated from available structural and seismic data. With these assumptions, we calculated the magnitude of principal stresses, as well as two key parameters to understand the orientation of the extension fractures: the dilatational tendency (DT) and the fluid pressure required to trigger an extension fracture (p^t). Both parameters (DT and p^t) depend on six variables: z , ϕ_1 , ϕ_3 , Φ , τ and T — depth, plunge of σ_1 and σ_3 , the stress ratio, the differential stress, and the tensile strength, respectively. Most of these variables are unknown; therefore, the calculations of DT and p^t are uncertain. To reduce uncertainty, we applied a probabilistic tool to reveal the range of plausible values of DT and p^t by means of a Monte Carlo modeling. In this modeling we choose a random value for each of the six variables, in a probabilistic range defined by the available information. We made 1.000 random simulations of DT and p^t , and we reorganized the results statistically to understand the distributions of plausible values of DT and p^t .

The results of the modeling were compared with field data of veins and dikes in 4 volcanoes of the SVZ. A suite of vein data from the Puyuhuapi and Tolhuaca volcanic complexes were used, as well as a suite of dikes data from the San Pedro-Tatara and Puyehue-Cordón Caulle volcanic complexes. The comparison with in situ extensional fracture data shows that dikes and veins are well represented by the lowest value of p^t , and the highest values of DT. Thus, we propose this model as a first-order approximation of the attitudes of dikes and veins, shedding light on the distribution of their orientations more precisely than the simplification of attitudes parallel to σ_1 .

Palabras Clave: Southern Volcanic Zone, Liquiñe-Ofqui Fault System, Extension Fracture, Principal Stress, volcanisms, and hydrothermal systems.

Agradecimientos: This contribution has been partially funded by CEGA (ACE210005).

Regional-scale structural architecture and geofluid pathways at the Principal Cordillera of the Maule Region, southern Central Chile

José Meulén Piquer Romo¹, Amanda Valdés Esquivel¹, Jorge Torres¹, Matías González¹, Tomás Fischer Guzmán¹, Bárbara González Gallardo¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Avenida Eduardo Morales Miranda, Valdivia, Chile

The Andes of southern Central Chile correspond to a transition zone between two contrasting segments of the continental margin. Towards the north, the Andes of central and northern Chile are characterized by a thick continental crust and the presence of giant porphyry-style Cu-Mo deposits, while towards the south, the Andes of southern Chile are characterized by a thinner crust and the absence of known porphyry systems. The main aim of this contribution is to discuss, in this crucial Andean segment, the regional-scale structural architecture of the Principal Cordillera, and the role of high-angle fault systems as permeability pathways, which control the flow of magmas and hydrothermal fluids through the continental crust and could explain the spatial distribution of long-lived (fossil and active) magmatic-hydrothermal centers.

The interpretations that will be presented here are based on detailed structural mapping, completed during the summer months of three different years. As a result of these mapping campaigns, a total of 1,337 fault planes were measured, 594 of which contain reliable kinematic information, mostly based on the geometry of syn-tectonic hydrothermal mineral fibers. Additionally, other 433 structural elements were measured, including dikes, hydrothermal veins, intrusive contacts, contacts of hydrothermal breccias, and bedding planes. The fault-plane database was used to calculate the paleo-stress tensor under which different faults were reactivated, at various geological episodes.

Based on the previously mentioned field data, complemented with indirect geological evidences such as alignments of intrusive bodies and hydrothermal centers, alignments of volcanic centers and minor eruptive vents, abrupt changes in the Meso-Cenozoic volcano-sedimentary stratigraphy, and regional-scale lineaments in satellite images, a new interpretation of the regional-scale structural architecture of this Andean segment is proposed.

Our results show that both arc-oblique and arc-parallel, regional-scale fault systems are relevant to understand the geologic evolution of this Andean segment. Arc-oblique fault systems strike preferentially WNW, although NW-NNW, E-W and NE-ESE striking fault systems are also relevant. Arc-parallel fault systems strike NNE. All these major fault systems acted as pathways for magmas and hydrothermal fluids, at least since the middle Miocene, although the type of magmatic-hydrothermal product varies depending on the orientation of a particular fault system relative to the predominant stress tensor, at a specific point in time.

Fault kinematics and paleo-stress tensor calculations reveal a complex and heterogeneous deformation history, although since the middle Miocene a transpressive tectonic regime dominates, with σ_1 trending ENE (parallel to the convergence vector between the Nazca and South America plates) and σ_3 trending NNW. Consistent with that, ~NW striking fault systems tend to favor longer residence times and control more differentiated magmatism, including magmas related to porphyry-style hydrothermal systems, while ~NE-striking faults (including those parallel to the orogenic belt) tend to allow a more rapid and efficient ascent of magmatic products across the continental crust, and are related to less evolved magmas and to the emplacement of dike swarms and sheeted veins.

To exemplify this, various cases of specific, newly defined fault systems, and their related magmatic-hydrothermal products, will be illustrated and discussed.

Keywords: Regional-scale fault systems, geofluid pathways, stress tensor, Andes, Maule Region.

Financing: Fondecyt project N° 11181048.

Acknowledgements: SERNAGEOMIN is acknowledged for logistical support during two of our mapping campaigns.

Tectonic setting, structures, and Au-Cu mineralization age of the Indiana Deposit: an example of ore deposit formation controlled by Andean Transverse faults, Atacama Region, Chile

Felipe Reinoso¹⁻², Martin Marquardt¹, Pamela Pérez-Flores⁵, Juan Díaz-Alvarado³, José Cembrano⁴, Andrés Folguera²

(1) Minería Activa SpA, Av. El Bosque Norte 0226, Oficina 502, Las Condes., Santiago, Chile

(2) CONICET-Universidad de Buenos Aires, Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN), Argentina

(3) Universidad Rey Juan Carlos, Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET, Móstoles, Spain

(4) Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Santiago, Chile

(5) Consultoría e Investigación Geológica Ambiental Ltda, Manuel Rojas 23, Huasco, Chile

The Indiana Deposit corresponds to a Cu-Au (Mo-Co) fault-vein deposit located in the Central Andes Coastal Cordillera Belt (~27°S). It is hosted by strongly altered volcanic and intrusive rocks located between the NNE-trending central and western branches of Atacama Fault System (AFS) in northern Chile. The CNN-Indiana District also includes the Iron-Copper bearing Cerro Negro Norte (CNN) deposits and the Cu-Au Galleguillos vein system, which along with the Indiana Deposit, give further insights into the mid-Cretaceous structural and lithological control of iron, copper and gold mineralization.

Mineralization in the Indiana Deposit is spatially and temporally related to NW- and ENE-striking fault-vein systems, which are kinematically unrelated to the AFS. Three main mineralized ENE-striking, hundred-meter-long structures have been identified in Indiana. Structural and kinematic data suggest that mineral precipitation took place at dilation zones (e.g. extensional jogs, transtensional fault terminations) generating steeply-plunging ore shoots in Indiana, and reactivating pre-existing structures (NW vein-fault system). We propose four deformational and concomitant mineralization-alteration stages in the evolution of the CNN-Indiana District. Sinistral transtensional kinematics observed in ENE-striking fault-vein structures postdates the activity of the margin-parallel Atacama fault system, which has for long been regarded as accommodating the strike-slip component of plate convergence during the Jurassic to middle Cretaceous neglecting the role of Andean Transverse Faults (ATF), such as the ones recognized in this study. Sinistral transtension along ENE-striking gave rise to a local NE-striking maximum principal stress, different from that arising from displacement along the main margin-parallel faults, which in turn is consistent with far field stresses at that time.

The Indiana deposit evolved from an early Ca-Na high temperature system related to Iron-bearing deposits to a brittle mineralized fault-vein copper-gold-bearing quartz-sericite (kspars-calcite) corridor associated with a lower temperature environment along ATF, which postdate the AFS. Re-Os ages obtained along the mineralized ENE-striking structures in Indiana are slightly younger than those obtained from similar deposits associated with deformation along the AFS, which is consistent with our field observations indicating that at least part of the strike slip displacement on transverse faults hosting mineralization outlasts that of the AFS.

Keywords: IOCG, Atacama Fault System, Andean Transverse Faults, Indiana deposit, Cretaceous mineralization.

Acknowledgments: We thank Minería Activa and their geological team for allowing the sharing of technical support and Alex Belmar for the previous work done on the Indiana project.

References:

- Arévalo, C., (2005). Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 91, 54.
- Piquer, J., Yáñez, G., Rivera, O., and Cooke, D. R., (2019). Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile, *Andean Geol.*, 46, 223–239, <https://doi.org/10.5027/andgeoV46n2-3106>.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., Romero, R., Rojo, M., (2020). Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Miner Deposita* 55, 409–428. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00879-3>.
- Seymour, N., Singleton, J.S., Gomila, R., Mavor, S.P., Heuser, G., Arancibia, G., Williams, S., Stockli, D.F., (2021). Magnitude, timing, and rate of slip along the Atacama fault system, northern Chile: implications for Early Cretaceous slip partitioning and plate convergence. *Journal of the Geological Society*; 178, jgs2020–142. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-142>.

Optimal geologic conditions for metal-rich hydrothermal systems in the Andes

Pablo Víctor Sánchez Alfaro¹, Daniele Tardani², Pamela Pérez-Flores³, Felipe Aron⁴, Fernanda Álvarez Amado⁵, Pablo Becerra⁵, Sebastián Rivas Bravo¹, Carolina Muñoz Sáez⁶

- (1) Universidad Austral de Chile, Instituto Ciencias de la Tierra, Valdivia, Chile.
(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile
(3) CIGEA Ltda.
(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile
(5) Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile
(6) University of Nevada Reno

Metal and heat flux through the crust in arc regions is strongly modulated by the interplay between tectonic activity and volcanism, which defines the evolution of magmatic-hydrothermal systems. The Southern Andes volcanic zone is an excellent natural laboratory to address such interplay because of the occurrence of regional, seismically active fault systems, intense volcanic activity, and abundant groundwater circulation leading to numerous hydrothermal systems. In this work, we integrate structural analysis at regional and local scale, heat and metal flux estimations, and geochemical analysis of hydrothermal fluids to define the evolution of tectono-volcanic-hydrothermal domains. We selected two hydrothermal systems in contrasting tectono-volcanic associations, (a) the NE-elongated Sollipulli stratovolcano, emplaced along NE-striking basement faults favorably oriented for shear and extension imposed by plate boundary deformation, and (b) the Puyehue-Cordon Caulle volcanic complex, located in a NW-trending tectono-volcanic domain, presumably built over fault network arrangements that promote development of magma reservoirs at the shallow crust. These hydrothermal systems are active and also show evidence of a long-lived evolution of hydrothermal alteration and silica sinter deposition, allowing us to compare present real-time chemical analysis of water and gasses with the long-term chemical signature. Preliminary geochemical results for Sollipulli from major, trace (precious and base metals) and isotopic data ($\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$) indicate the presence of a mature geothermal system and supports the model of a geochemical evolution of hydrothermal fluids controlled by fluid-rock interaction with no direct magmatic contribution for this tectono-volcanic association. Unlike the Sollipulli, the fluid chemistry of surface features at Puyehue-Cordón Caulle indicate steam heated waters that are controlled by argillic alteration and magmatic contribution indicated by isotopic data ($\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$). Surface temperature obtained with a thermal drone and CO_2 flux measurements complement structural and geochemical data at local scale. Results from this study provide new insights towards the role of tectono-volcanic associations on heat and metal fluxes and their implications to exploration for mineral and geothermal resources in the Andes.

Keywords: Hydrothermal, Cordón Caulle, Sollipulli, LOFS, geothermal.

Financing: We acknowledge support from FONDECYT #1201219, FONDECYT #11220777, ANID-FONDAP project 15200001 and Millennium Science Initiative grant NC130065.

Patrones de deformación durante el Cretácico en sistemas estructurales de tipo IOCG: caso de estudio Mina Huracán, distrito Tiltill (33°S)

Katherine Toro Abarzúa¹, Tomas Roquer Rodríguez¹, Carlos Marquardt¹, Rocio Rudloff Del Villar², Andrés Pavez²

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Escuela de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Geo3: Integral Solutions in Geology, Geophysics and Geomatics, Camino Santa Rosa N°3040, Parcela 15, Lampa, Chile

A lo largo de la Cordillera de la Costa del centro-norte de Chile, se han descrito depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG), apatita de hierro (IOA), cobre estratificado (Cu-Ag) y pórfidos de cobre, los cuales están asociados con cinturones metalogenéticos desarrollados en el Jurásico y Cretácico. Durante estos períodos, el régimen tectónico a lo largo del margen de América del Sur se caracterizó por un entorno extensional a transtensional. Sin embargo, en la transición del Cretácico Temprano al Cretácico Tardío, el régimen tectónico cambió a un margen continental de tipo transpresional a compresional. En estudios previos, se caracterizaron varios yacimientos del distrito minero Tiltill (33°S) y se concluyó que están asociados con la evolución tardímagmática del Plutón Caleu (~94 Ma). En particular, para Mina Huracán perteneciente a este distrito, se reconocen cuatro etapas de alteración hidrotermal: (1) alteración potásica temprana de baja ley de cobre; (2) alteración de albita-actinolita estéril intermedia; (3) alteración sericitica principal y clorita-epidota con piritita-calcopirita (bornita menor), cuarzo-hematita (especularita), turmalina y ocasionalmente magnetita en vetas, vesículas y zonas de deformación dúctil; y (4) alteración tardía estéril de vetas de calcita-cuarzo.

En Huracán la mineralización se concentra en la tercera etapa de alteración hidrotermal y se presenta en vetas, por lo que es interesante entender las condiciones estructurales que permitieron su emplazamiento, donde las orientaciones σ_1 y σ_3 de fracturas de dilatación (diques y vetas minerales) son esenciales para comprender los paleo-estreses. Dado que los polos de las fracturas naturales a menudo muestran una distribución multimodal, la agrupación de las orientaciones es crítica para la descripción y el análisis de los paleo-estreses de estas estructuras. En Japón, a partir de las orientaciones de diques ígneos del Mioceno, se logró detectar dos paleo-estreses utilizando una distribución Bingham mixta con este propósito. Se asumió que la apertura de las fracturas es producto de presiones de fluido esporádicas PF que aumentan sobre el esfuerzo normal σ_n , en condiciones de un estado de esfuerzo en campo lejano constante. El principio fundamental del método es que, dado que el plano que contiene σ_1 y σ_2 (plano perpendicular a σ_3) es aquel que contiene el valor más pequeño de σ_n , una presión de fluido PF menor que $\sigma_n = \sigma_3$ no puede formar fracturas abiertas. Por lo tanto, las fracturas perpendiculares al eje σ_3 cumplen con la condición de tracción con PF más baja; y las fracturas perpendiculares al eje σ_1 , sin embargo, requieren la PF más alta. Suponiendo que las fracturas de dilatación tienen simetría ortorrómbica, pueden ocurrir dos patrones estereográficos de miembros extremos según el valor de ϕ : (1) para compresión axial ($\phi = 0.00$), un patrón elíptico o en forma de cinturón de polos sobre el plano $\sigma_2\sigma_3$; o (2) para tensión axial ($\phi = 1.00$), un patrón axial de polos alrededor del eje σ_3 . Los estados de esfuerzo triaxiales producen patrones estereográficos intermedios.

Tomando el ejemplo de Japón, en este trabajo nos hemos enfocado en estudiar la disposición de las estructuras dilatacionales de Mina Huracán, con el objetivo de determinar los patrones de deformación que permitieron la mineralización de este yacimiento. Utilizando la metodología Yamaji y las orientaciones de las vetas y veta-fallas se buscó determinar los ejes de esfuerzo y la relación de esfuerzo de cada grupo de fracturas y así determinar las condiciones tensionales que permitieron la mineralización.

Los resultados preliminares de nuestro análisis indican que es posible establecer un patrón elíptico de los datos en su representación estereográfica, lo que indica condiciones de compresión axial en el momento de formación de estas estructuras, con σ_2 o σ_3 verticales. Esto se traduce en un régimen transpresivo, donde σ_1 (eje P) tiene orientación NW con variación de σ_2 (eje B) y σ_3 (eje T). Estos resultados preliminares son concordantes con el inicio del período de transición del Cretácico Temprano al Cretácico Tardío, donde el régimen tectónico cambió a un margen continental de tipo transpresional a compresional.

Como conclusión, mediante el uso del método Yamaji es posible determinar que las vetas y veta-fallas de Mina Huracán se desarrollaron en un régimen transpresivo, concordante con el contexto tectónico transicional de margen continental transpresional a compresional del período Cretácico Temprano al Cretácico Tardío en el área de estudio, y la mineralización económica (generada durante la tercera etapa de alteración hidrotermal) ocurriría de forma sintectónica durante este período.

Palabras Clave: fracturas dilatacionales, método Yamaji, patrones de deformación, sistemas estructurales de tipo IOCG, distrito Tiltill.

Financiamiento: Pontificia Universidad Católica de Chile y DICTUC.

Referencias:

- Roquer, T., Arancibia, G., Rowland, J., Veloso, E., Molina, E., Crempien, J., Morata, D. 2020. The effect of axial stress in maximum sustainable fluid pressure in Andersonian and non-Andersonian crust: A field-based numerical study from the Southern Andes (39 ° S). *Journal of Structural Geology* 140 (2020) 104131.
- Rudloff, R. 2021. Génesis de depósitos minerales de Cu y Au de la franja metalogénica cretácica de Chile Central: distrito minero Til Til. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Yamaji, A., Sato, K., 2011. Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distribution and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *Journal of Structural Geology* 33 (7), 1148–1157.
- Yamaji, A., 2016. Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations: a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations. *Isl. Arc* 25 (1), 72–83.

El rol del grado de exposición de regolitos con protolitos graníticos y sus características geoquímicas en la Cordillera de Costa de los Andes Centrales

Nicolás Bustos Müller¹, Carlos Marquardt¹⁻², Tomás Roquer¹, Paulina Vergara Torrejón¹, Katherine Toro Abarzúa¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile

El estudio busca estudiar características geoquímicas y pedogenéticas en regolitos de origen granítico de la Cordillera de Costa, Chile, en la región del Biobío. En particular se escoge un área de estudio acotada, para lograr un análisis e interpretación que estén restringidos con mayor probabilidad a zonas litológicas homogéneas. Para esto se procesan datos geoquímicos de elementos mayores y trazas obtenidos de muestras superficiales regolíticas, y se correlacionan con datos morfométricos de las zonas de estudio. Las muestras superficiales son clasificadas según el horizonte regolítico y la litología interpretada en terreno, y a partir de esta clasificación se procede a estudiar cómo cambia la proporción de elementos móviles e inmóviles entre horizontes de litología homogénea. Esta clasificación permite estudiar los cambios ocurridos en horizontes homogéneos cuando estos se encuentran emplazados o desarrollados en zonas de pediplanicies o en laderas pronunciadas con mayor grado de exposición. Este último término se refiere a zonas con erosión activa, donde horizontes normalmente "profundos", por ejemplo saprolitos, quedan expuestos a la superficie y se ven sometidos a alteraciones supérgenas más someras; en estas zonas es donde se encuentra evidencia de neoformación de horizontes pedolíticos y de removilización de elementos. Para comprender mejor estos procesos geoquímicos superficiales, se busca contrastar el comportamiento de la fracción intercambiable de los regolitos (esto es, la fracción soluble en sulfato de amonio) con relación a su concentración total. Este ejercicio de clasificación y correlación permite determinar diferencias críticas entre horizontes y sus grados de exposición.

Los regolitos estudiados muestran cambios importantes en el fraccionamiento de elementos traza según se avanza hacia horizontes con mayor grado de meteorización química y física, al igual que en la movilización de elementos móviles. Por ejemplo, existe un fraccionamiento en los elementos de las tierras raras que acumula sus elementos livianos en zonas bien preservadas, mientras que, en regolitos parcialmente erosionados, se hace más preponderante la proporción de elementos pesados. Por otro lado, se logra cuantificar cómo elementos como el potasio (K), el estroncio (Sr) y el calcio (Ca) aumentan progresivamente desde pedolitos superiores hasta saprolitos inferiores. Igualmente, pudo notarse que elementos no móviles, como el circonio (Zr) y el niobio (Nb), efectivamente no muestran cambios relevantes cuando se está en zonas de litología homogénea. Esto último puede corresponder a un importante *proxy* para la interpretación y diferenciación de litologías en zonas sin afloramientos de roca fresca, pues cambios súbitos de estos elementos pueden corresponder a alternancias litológicas no detectables en regolitos con alto grado de alteración, como pedolitos o incluso saprolitos, en los que ciertos minerales clave para la descripción del protolito ya están muy alterados o destruidos. Resultados preliminares también muestran que, en zonas con mayor exposición a laderas, los pedolitos y saprolitos tienden a dejar de ser estadísticamente distintos para ciertos elementos. Este resultado puede complejizar aún más la labor de descripción macroscópica en regolitos, y supone una nueva problemática en el transporte de elementos durante lixiviaciones laterales.

El estudio y mayor comprensión de estas características geoquímicas en regolitos más o menos expuestos a procesos de erosión, es de gran importancia para la exploración de depósitos asociados a regolitos, como depósitos lateríticos, bauxíticos o de tierras raras hospedadas en regolito. Es más, las correlaciones encontradas pueden permitir mejores vectorizaciones hacia cuerpos mineralizados, sus leyes estimadas y potencias económicas.

Palabras Clave: Regolitos, Pedogénesis, Cordillera de la Costa, Geoquímica de elementos traza, Meteorización.

Financiamiento: Financiamiento de Pontificia Universidad Católica de Chile y DICTUC.

Trabajos de Exploración en el prospecto Los Azules: Target de Cu-Mo en clúster de Brechas hidrotermales qz-tur en la franja metalogénica del Paleoceno

Carlos González¹

(1) Compañía Minera Carmen Bajo, Departamento de Geología, Copiapó, Chile

Como resultado de la planificación estratégica de exploración Greenfield en Compañía Minera Carmen Bajo, se han desarrollado targets con potencial para el crecimiento en recursos geológicos futuros para la empresa. Entre estos prospectos se encuentra Los Azules.

Los Azules se ubica 60 kilómetros al este de Copiapó y se puede acceder por la ruta que conecta esta ciudad con la ciudad Diego de Almagro. Las propiedades que amparan el depósito mineral son: Refuerzo 1/50, Los Azules 1/5, Valedor 1/60 y Azul II 1/10 que totalizan 817 hectáreas.

El prospecto corresponde a un clúster de brechas hidrotermales con matriz de cuarzo-turmalina y hematita, alojadas regionalmente en las granodioritas del Plutón Cabeza de Vaca, de edad Paleocena, que a su vez, se encuentra ubicado dentro de la Megacaldera Carrizalillo.

En el proyecto se han realizado trabajos de geofísica, específicamente IP (3 perfiles E-W) que muestra tres zonas de cargabilidad, una de las cuales es consistente en los tres perfiles realizados y se encuentran abiertos en profundidad. Geoquímica, se tomaron 276 muestras desde superficie que evidencian anomalías de Se, Te, Mo, Cu, W, Au, Ag, Re y U, entre otros. La distribución de estos elementos indica un fuerte control litológico para el Cu y Mo alojado principalmente en las brechas. De acuerdo con estos antecedentes, se realizaron 2 campañas de sondajes de diamantina con 11 pozos, totalizando 2.550 metros.

La geología local del proyecto, la componen granodioritas, brechas de cuarzo turmalina, monzodioritas y diques félsicos. Del enjambre de brechas presentes, en las campañas de sondajes, se interceptaron las 3 brechas de mayores dimensiones (Brecha Norte, Brecha Este y Brecha Central). En cuanto a la alteración presente, existe predominio de cuarzo-sericita, con fases menores de clorita-sericita, tanto en las brechas como en la caja granodiorítica. Se observa de igual forma, alteración potásica débil con superposición de cuarzo-sericita, y propilitica débil. Con respecto a la mineralización presente: la mineralización primaria, sumado a la influencia de la meteorización en el sector y la morfología del área han generado el desarrollo de zonas de mineralización consistentes y correlacionables. En la zona de lixiviación predomina jarosita y goethita, en la zona de oxidación predomina crisocola, atacamita y brocantita junto a zonas de cuprita. La zona de enriquecimiento se caracteriza por el reemplazo de minerales primarios como calcopirita en calcosina a partir de bordes y fracturas. La zona de sulfuros primaria predomina pirita por sobre calcopirita, puntualmente se observa molibdenita. La potencia de cada nivel varía entre 20 y 40 metros (exceptuando el nivel primario) y de hasta 60 metros.

En cuanto a la geología estructural del sector, se reconocen dos sistemas principales: un sistema N10°-20°E que controla la distribución de las brechas de mayores dimensiones (como la brecha central de Los Azules y Brecha Araya, al SW de Los Azules) en el sector. En cuanto al sistema NW, este controla la distribución de diques, vetas y vetillas de cuarzo-turmalina, adicionalmente se identificaron 2 corredores estructurales con directa relación al contenido de mineralización presente.

En relación a las leyes desde los sondajes, el análisis de los elementos anómalos indicó al igual que en superficie valores sobre el promedio Clarke para el Cu, Se, Mo, Re, Sb, Te, W, As, Sn, Bi, U. Al ubicar la distribución de estos elementos en el sector, se observa que elementos como el Cu, Mo, Sn y U se alojan principalmente en las brechas y elementos como Sb, Te y As se distribuyen en la caja granodiorítica.

Si consideramos la información extraída de la carta geológica de Sernageomin, en donde especifica que el sistema NE que controla la distribución de las grandes brechas es un sistema de falla normal distrital con manteo al oeste se generaría una configuración de 2 bloques: el bloque yacente oeste con predominio de brechas que probablemente utilizaron el régimen extensional de la falla normal y un bloque colgante este con predominio de granodiorita y en donde se alojan los mayores valores de Te, As y Sb. Esta configuración determinaría para el bloque Este el encontrarse en la zona alta de un sistema de pórfido y el bloque oeste contener en las brechas hidrotermales los elementos de mayor profundidad como el Cu, Mo y Sn.

Adicionalmente, en el bloque Este, se observaron evidencias de potencial ambiente de pórfido, tales como: presencia de vetillas tipo A en arreglo tipo stockwork y como vetillas subparalelas ("sheeted veins"), vetillas tempranas de biotita tipo EB, el predominio de vetillas tipo D asociada a la alteración cuarzo-sericita.

Palabras Clave: Geoquímica, Brechas Hidrotermales, Pórfido Cu-Mo, Exploración, Paleoceno.

Financiamiento: Compañía Minera Carmen Bajo.

Génesis de los placeres de oro del Cordón Baquedano, Isla Tierra del Fuego (54°S)

Carlos Marquardt¹, Tomás Roquer¹, Felipe Del Valle¹, José Joaquín Jara¹, Juan Serra¹

(1) Pontificia Universidad de Chile, Departamento de Minería y Departamento de Estructuras y Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

Los placeres o lavaderos de oro se forman mediante la acción de procesos superficiales de meteorización, erosión, transporte y deposición que afectan a rocas o sedimentos que contienen mineralización aurífera, provocando la concentración mecánica de partículas con oro en depósitos sedimentarios. Dependiendo de las condiciones ambientales en las que ocurren estos procesos superficiales se pueden definir distintos tipos de placeres de oro, por ejemplo, de tipo aluvial, fluvial, coluviales, glacial, eólico o de playa, entre otros. Este trabajo realiza un reconocimiento geológico de los depósitos de placer de oro contenidos en grava y sus fuentes rocosas utilizando técnicas de mapeo geológico y geomorfológico, y descripciones sedimentológicas. El área de estudio forma parte del Distrito Minero de placeres de oro ubicado en el Cordón Baquedano, en la parte norte de la Isla Tierra del Fuego, Región de Magallanes; que corresponde a una serranía de 600 m de altitud y dirección NW-SE. Hasta ahora, el origen de los placeres de oro de este Distrito se ha relacionado con las grandes glaciaciones del Pleistoceno Superior, indicando que los glaciares erosionaron rocas de la Cordillera Darwin, transportando sedimentos y liberando partículas de oro 40-50 km hacia el oeste o noroeste hacia la zona donde hoy está ubicado el Cordón Baquedano, concentrándose partículas de oro en un ambiente sedimentario de origen fluvio-glacial. Nuestros resultados indican que el origen de los placeres de oro está relacionado con dos eventos fluviales. El primero está relacionado con el desarrollo de una llanura fluvio-aluvial de antepaís o trasarco ocurridos durante el plioceno y pleistoceno inferior, previo a la ocurrencia de los grandes periodos glaciales del cuaternario, y que tiene relación con el último periodo de relleno continental de la cuenca de Magallanes. Estos depósitos forman parte de la unidad conocida como Formación Palomares, la cual además está relacionado con un gran pedimento parcialmente preservado en la región y que corona las partes altas de sus serranías. La fuente de las rocas contenidas en estos depósitos proviene de la Cordillera Darwin, donde es posible observar afloramientos con tipos de roca, mineralización, alteración y estructuras (por ejemplo, vetas y stockwork de sílice con sulfuros), equivalentes a los clastos de rocas presentes en los depósitos de la Formación Palomares. El segundo evento fluvial tiene relación con procesos superficiales que ocurren localmente en el Cordón Baquedano, en particular el desarrollo y evolución de las hoyas hidrográficas y redes de drenajes actuales que erosionan a la Formación Palomares y su sustrato producto de repetidos eventos de incisión y deposición fluvio-aluviales que ocurren en la cabecera de las hoyas hidrográficas. Esto produce la reconcentración de partículas de oro en las morfologías fluviales más jóvenes (por ejemplo, paleocanales en terrazas fluviales encajonadas y en canales activos), probablemente durante el Pleistoceno Superior en paralelo a los avances de los glaciares que erosionaron parte del Pedimento asociado a la Formación Palomares, dejando como remanente el Cordón Baquedano y el Estrecho o Canal de Magallanes y el Canal de Bahía Inútil, entre otras morfologías remanentes de la zona. Este trabajo resalta la importancia de realizar estudios geológicos detallados para preparar los modelos geológicos necesarios para proponer estrategias mineras sostenibles para la evaluación y desarrollo de placeres de oro.

Palabras Clave: Placeres de oro, Cuenca de Magallanes, Cuenca de antepaís, Depósitos fluviales.

Supergene copper mineralization as a paleo-environmental proxy

Paula Montiel¹, Stephanie Brichau¹⁻², Marcelo Farias¹, Eduardo Campos³, Stephanie Duchene², Rodrigo Riquelme³, Sandrine Choy², Marc Poujol⁴, Jorge Morales³, Mathieu Leisen², Fernando Poblete¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Pl. Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Université de Toulouse, Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université Paul Sabatier, 14 avenue Edouard Belin, TOULOUSE, France

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Casa Central. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(4) Université de Rennes, Géosciences Rennes, Bât.15 campus Beaulieu, Rennes, France

Copper is one of the most widely used metals in industries. However, the factors controlling the formation and conservation through time of supergene copper mineralization (SCM), remain unclear. In Chile, most copper ore deposits are formed at the end of magmatic activity (porphyry-copper) due to hydrothermal fluids (hypogene deposits), and by secondary alteration by surface fluids (supergene deposits). The parameters controlling the formation and conservation of SCM are: 1) the emplacement of a magmatic/hydrothermal source of metals (porphyry-copper system); 2) the tectonics to uplift the porphyry-copper system and the water table; 3) the climate to provide enough water for the leaching, transport and precipitation of SCM; and 4) the erosion rates to bring the porphyry-copper system to surface with mechanical weathering the supergene profile. As a result, it is clear that these deposits form under specific paleo-environmental conditions and thus at specific timings. The main objective of this project is to constrain the relative impact of each parameter to understand, define and predict these conditions at a geologic time scale.

In Chile, previous studies have proposed that SCM may occur either during the initial stages of increasing relief; periods of maximum erosion and relief; or during landscape pediplanation (relief flattening). Therefore, our aim is to understand when during the mountain range evolution (construction, incision or flattening), SCM are emplaced and how long after the porphyry-copper exhumation. To reach this goal, we have selected eight porphyry-copper districts located in different morpho-tectonic and climatic contexts to collect samples from SCM and porphyry which will be used as archives of the past environmental conditions. By comparing the exhumation histories of the porphyry-copper (using thermochronology) with the age of the SCM formation (geochronology) we hope to understand which parameter(s) play(s) a key role in the formation and conservation of these SCM. All the samples for this study have been collected and their petrographic characterization initiated.

Palabras Clave: Supergene copper mineralization, Morpho-tectonics, Climat, geo-thermochronology, Andes.

Financiamiento: Fondecyt Regular 1220062; Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

Agradecimientos: Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Minerales del supergrupo de la alunita como proxies para entender la evolución del paisaje y su relación con la alteración supérgena en el segmento sur de la Precordillera, Desierto de Atacama, Chile

Jorge Morales Leal¹, Eduardo Antonio Campos Sepulveda¹, Rodrigo Riquelme¹, Michel Gregoire², Bertrand Moine⁴, Richard Spiking³, Sylvie Castet²

(1) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Géosciences Environnement Toulouse - IRD, 14 Av. Edouard Belin, Toulouse, Francia

(3) Université de Genève, Department of Earth Sciences, 24 rue du Général-Dufour 1211, Ginebra, Suiza

(4) Université Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, 49 bd François Mitterrand, Clermont-Ferrand, Francia

El desarrollo de la alteración supérgena es controlado por la disponibilidad de agua meteórica y de las tasas de alzhamiento, factores que también controlan la evolución del paisaje en el Desierto de Atacama. De aquí se desprende que la formación de minerales en los perfiles de alteración supérgena tienen el potencial para entregar señales de la evolución del paisaje. Si bien, en el segmento sur del Desierto de Atacama (26 a 27° S.) existen una serie de estudios que caracterizan los rasgos geomorfológicos en la Precordillera y Depresión Central, estos no disponen de una geocronología de detalle que permita definir la temporalidad de los eventos que se han sucedido desde la fase tectónica Incaica (Eoceno) al presente y cómo estos influenciaron el desarrollo de múltiples pulsos de alteración supérgena en la Precordillera y la preservación de perfiles de meteorización y rasgos geomorfológicos. Debido a esta falta de información se ha desarrollado este estudio, que busca comprender la relación entre ambos procesos a lo largo de la historia geológica cenozoica de este segmento. Para lograr este objetivo propuesto se realizaron estudios de geoquímica, geocronología de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e isotopía estable de δD , $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{34}\text{S}$ en minerales del supergrupo de la alunita reconocidos en un perfil de meteorización localizado en el distrito Potrerillos. Estos minerales tienen la cualidad de registrar información que se puede relacionar con procesos de alzhamiento, denudación y clima, además de aportar información sobre la proveniencia y características de los fluidos parentales. La composición isotópica de los minerales analizados (principalmente jarosita, natrojarosita y alunita) indica un evidente origen supérgeno y su geocronología señala una serie de eventos de alteración supérgena entre el Paleoceno y el Plioceno, siendo dos de estas edades los registros más antiguos en el Desierto de Atacama. Respecto a la evolución del paisaje, la composición isotópica de las muestras indica un periodo de mayor humedad desde el Paleoceno al Mioceno derivado del aumento de la temperatura en el área fuente de los fluidos meteóricos, coincidente con la etapa de mayor enriquecimiento supérgeno de cobre en el Desierto de Atacama. Además, los datos isotópicos evidencian un evento de alzhamiento durante el Mioceno temprano a medio en la Precordillera, que propició la formación del pediplano Asientos. Posterior a los 10 Ma, los datos indican un aumento en la aridización en el área que ocasionó una mayor evaporación de las aguas meteóricas. Por otra parte, los registros obtenidos de alteración supérgena confirman un clima semiárido – árido en el segmento sur de la Precordillera hasta el Plioceno, contrastando con la hiperaridez de la Depresión Central y el margen oeste de la Precordillera indicada por otros estudios. Finalmente, el desarrollo de la actividad supérgena estuvo supeditado a eventos tectónicos desde el Eoceno y a los cambios geomorfológicos mayores sin inducir mayor exhumación de roca en el área. Posterior a los 6 Ma, la incisión de las quebradas actuales influenció el descenso del nivel freático propiciando la exposición de sulfuros y reactivando el proceso de alteración supérgena en zonas cercanas a las quebradas. Estos antecedentes sugieren que la alteración supérgena podría tener una dinámica distinta hacia el flanco este de la Precordillera, contrastando con lo que se sabe en los perfiles de meteorización del flanco oeste de la misma y en la Depresión Central, lo que tendría un impacto directo en la exploración de depósitos de cobre supérgeno.

Palabras Clave: Alteración supérgena, Evolución del paisaje, Mineralización supérgena, Desierto de Atacama, Supergrupo de la alunita.

Financiamiento: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile, por medio de la beca doctorado nacional N° 21180114 y por el proyecto FONDECYT regular N° 1170992.

Configuración estructural de la cuenca de Chañarcillo entre los 28°20' y 28°40' y su relación en la distribución de las ocurrencias minerales

Rocío Peñailillo Salgado¹, Guillermo Fuentes Espinoza¹⁻², Sebastián Perroud Rainone¹⁻²

(1) Universidad Santo Tomás, Ingeniería, Geología, Ejército, 146, Santiago, Chile

(2) TECT Geological Consulting, Santiago, Chile

La Cuenca de Chañarcillo es una cuenca extensional de tras-arco del Jurásico Superior al Cretácico Superior, que se dispone entre los 27° y 29°S, la cual se caracteriza por presentar una configuración estructural asociada predominantemente a la inversión tectónica, ya que presenta estructuras tanto extensionales como compresionales (Amibilia, 2009; Martínez et al., 2013 y 2015; Ochoa et al., 2015; Perroud,

Las características geológicas y arquitectura estructural de la cuenca proporcionan el espacio suficiente para el emplazamiento de depósitos de óxidos de cobre-hierro-oro (IOCG; sigla en inglés) y depósitos estratoligados de cobre (Maksaev et al., 2007), los cuales se alojan en rocas volcánicas, sedimentarias marinas y continentales del Jurásico y Cretácico Inferior (Meneses, 2016). Sin embargo, en el área de estudio ubicada en la III región de Atacama, al Noroeste de la ciudad de Vallenar, entre los 28°20' y 28°40' S, los entornos estructurales más favorables para el emplazamiento de estos depósitos no han sido identificados en su totalidad, siendo un relevante nicho de investigación. Así, el objetivo de este estudio es comprender los controles estructurales a escala regional y local, y su relación en la distribución de las principales ocurrencias minerales identificadas, a través de la fotointerpretación, levantamiento geológico-estructural *in situ*, y teledetección en un sistema de información geográfica (SIG).

Las estructuras regionales reconocidas, afectan a las unidades estratificadas volcano-sedimentarias del Jurásico Superior y Cretácico Inferior-Superior, específicamente la Formación Punta del Cobre (JKpc; Segerstrom y Ruiz, 1962) y Grupo Chañarcillo (Kch; Segerstrom y Parker, 1959), y corresponden principalmente a fallas normales reactivadas y segmentadas de rumbo preferencial N-S con leves variaciones de 5 a 15° al NW y NE.

Las estructuras locales reconocidas, corresponden a vetas, fallas de carácter inverso y normal, y vetas-fallas, las cuales se encuentran comprendidas en dos subáreas, una ubicada en la Formación Punta del Cobre (JKpc), definida como Estación Remolino y la otra ubicada entre la Formación Punta del Cobre y la Formación Nantoco (Kin), la cual pertenece al Grupo Chañarcillo (Kch), y está definida como Estación Quebrada Toro Muerto.

En la estación Remolino se presentan vetas de apertura, con un espesor estimado entre 1,5 metros a 2 metros, también vetas-fallas, con un comportamiento NNW-SSE, y manteos subverticales, el control estructural es dado por un pliegue anticlinal con rumbo preferencial NW-SE, de eje asimétrico con vergencia W, y que es responsable de la mayor deformación y zona de daño expuesta en superficie evidenciada en su limbo oriental, provocando la formación de las estructuras ya mencionadas anteriormente.

En la Estación Quebrada Toro Muerto, se presentan vetas de apertura, con un rumbo preferencial NNW-SSE, y manteos que varían 60-75°, mientras que las fallas tienen un rumbo preferencial NNW-SSE y NNW-SSE, el control estructural es dado por una falla normal reactivada con vergencia W de orientación NW-SE, la cual afecta a la Formación Punta del Cobre, y es responsable de la deformación y zona de daño expuesta en superficie, dando paso a la formación de las estructuras locales ya mencionadas. Los cuerpos mineralizados de ambas subáreas corresponden a vetas de apertura con contenido de óxidos de cobre y carbonatos de cobre como crisocola y malaquita, respectivamente, óxidos de hierro, como hematita, jarosita y goethita que se encontraban en pátinas, de manera previsiva, y/o masiva, albergados en rocas volcánicas predominantemente andesitas porfídicas de la Formación Punta del Cobre. También, en rocas sedimentarias clásicas, representadas por la ocurrencia de los siguientes minerales: clorita, sericita, albita y actinolita, albergadas en la Formación Nantoco.

El control estructural regional, y la litología presente, tienen directa relación en el ascenso de fluidos de diversos tipos y estilos de mineralización, asociados a depósitos tipo IOCG y estratoligados, ya que las litologías volcánicas de la Formación Punta del Cobre, tienen baja porosidad primaria y/o permeabilidad, y las estructuras locales ayudaron a concentrar fluidos en áreas donde pueden precipitar la mineralización.

Las ocurrencias minerales están relacionadas a zonas de deformación secundaria, acomodo local y zonas de transferencia evidenciadas en repetición de unidades estratificadas y segmentación de estructuras.

Palabras Clave: Cuenca de Chañarcillo, Control estructural, Mineralización.

Financiamiento: Proyecto de Investigación Zonas de alta permeabilidad - Dirección de Investigación Aplicada e Innovación de la Universidad Santo Tomás.

Agradecimientos: Quiero agradecer a mi profesor Guía, Guillermo Fuentes, por el apoyo y conocimiento entregado. Sumado a ello, agradecer a Sebastián Perroud, por toda dedicación, aporte y retroalimentación entregada.

Referencias:

- Amibilia, A., 2009. Compressional deformation along the Chañarcillo basin west margin: North Chilean Late Jurassic-Early Cretaceous back-arc basin. Trabajo de Geología, Universidad de Oviedo, 29: 78-83.

- Arévalo, C. & Welkner, D., 2008. Carta Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geológica Básica, escala: 1:100 000.
- Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I. y Deckart, K., 2013. The structure of the Chañarcillo Basin: an example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile, J. South Am. Earth Sci., 42, 1–16.
- Martínez, F., Maksymowics, A., Ochoa, H. y Díaz, D., 2015. Geometry of the inverted Cretaceous Chañarcillo Basin based on 2-D gravity and field data – an approach to the structure of the western Central Andes of northern Chile. Solid Earth, 6, 1259-1276.
- Meneses, G., 2016. Estudios de diagnóstico geológico distrital 2015, Distrito Morado sureste. Informe, Empresa Nacional de Minería, Vallenar.
- Peñailillo, R., 2022. Configuración estructural de la cuenca de Chañarcillo entre los 28°20' y 28°40' s y su relación en la distribución de las ocurrencias minerales. Memoria para optar al título de geólogo. Escuela de Geología, Universidad Santo Tomás.
- Perroud, S., 2017. Geología y Evolución tectónica de la cuenca de Chañarcillo, entre los 28°20' y 28°40' s. Memoria para optar al título de geólogo. Escuela de Geología, Universidad Santo Tomás.
- Segerstrom, K. & Parker, R. L., 1959. Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Carta Geológica de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 33 pp.
- Segerstrom, K. & Ruiz, C., 1962. Cuadrángulo Copiapó, Prov. De Atacama. Vol. 6, Inst. Inv. Geol., Carta Geol. Chile, 115 pp.

Phreatic versus vadose meteoric diagenesis of hyper-arid soils: evidence from a Nitrasol and Gypsisol

Fabián Valencia-Castro¹, Rebeca Martín-García², Álvaro Rodríguez-Berriguete², **Rodrigo Riquelme**¹, Francisco Remonsellez³⁻⁴

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad Complutense de Madrid, Petrología y Mineralogía, Ciencias Geológicas, C. de José Antonio Novais, 12, Madrid, España

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(4) CEITZASA, Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

The Nitrasol and Gypsisol evaporitic soils belonging to the nitrate deposits of the hyper-arid core of the Atacama Desert consist of rocks of alluvial origin with a lithified evaporitic fabric. The current concepts to understand the petrography of soils are based on geochemical and mineralogical arguments. However, Nitrasol and Gypsisol samples present a series of meteoric diagenetic microstructures and textures never before described in the Atacama Desert. With the hypothesis that optical microscopy photographs allow the visualization of evaporite microstructures and textures, we describe the protolith, pedogenetic morphologies, cements, and evaporite replacements. The protolith of Nitrasols is a shale that gradates to litarenites of fine to coarse sizes, presenting vertical and circumgranular desiccation cracks, and skeletal morphologies of primary evaporitic minerals. While Gypsisols formed in sandstones gradating to fine-to-medium sized polymictic conglomerates, presenting significant vertical and circumgranular desiccation cracks, which cause microfragmentation of the evaporite fabric. Both types of soils present evaporitic replacements and meteoric cements: isopachous and anisopachous crusts, meniscus, blocky and poquilitopic cements. We interpret that both rocks have been affected by a marked meteoric diagenesis, linked to phreatic level variations that lead to alternation between phreatic and vadose conditions with some extreme atmospheric exposure events. The types of vadous cements are influenced by leaching mechanisms, that is, there is a localized distribution of salts in the contacts with the protolith grains and as saline droplets that unite the grains. While the phreatic cements are influenced by a supersaturation of water with high salt content in the pores, causing dissolution, reprecipitation, cementation and massive evaporitic replacements. We conclude that the phreatic meteoric diagenesis is a rapid process, in relation to the vadose meteoric diagenesis, and that, depending on the alteration of the protolith, the types and degrees of replacements, and the formation of pseudomorphs and cements, we can indicate the phreatic variations and their temporality relation with vadous events.

Palabras Clave: meteoric diagenesis, phreatic zone, vadose zone, Gypsisol, Nitrasol

Financiamiento: Beca de Doctorado nacional, ANID Universidad Complutense de Madrid, España Universidad Católica del Norte, Chile Copedim, IRD, Francia.

Agradecimientos: To ANID for financing the doctoral research project and to the professors of the Department of Petrology and Mineralogy of the Complutense University of Madrid, Spain.

Referencias:

- Chong, G., Pueyo, J., Vega, M. 1998. Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, v.25 n.1 Santiago jul. 1998.
- Choquette, P.W., and James, N.P., 1990. Limestones: the burial diagenetic environment, in McIlreath, I.A., and Morrow, D.W., eds., *Diagenesis: Geoscience Canada*, p. 75–111.
- Ericksen, G.E. 1994. Discussion of a petrographic study of Chilean nitrates: *Geological Magazine*, v. 131, p. 849–852.
- Wright, V.P., 1990. A micromorphological classification of fossil and recent calcic and petrocalcic microstructures. In: Douglas, L.A. (Ed.), *Soil Micromorphology: A Basic and Applied Science. Developments in Soil Science*, vol. 19. Elsevier, Amsterdam, p. 4012407.

Los bolsones salinos como herramienta de exploración de yacimientos bajo cobertura aluvial: el caso de la Pampa Buenos Aires

Rodrigo Riquelme S.¹, Pablo Oliva V.², José Antonio San Vicente³

(1) Universidad Católica del Norte, Ciencias Geológicas, Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(3) Guanaco Compañía Minera, Panamericana Norte Km 1198, Taltal, Chile

La superficie aluvial de la Pampa Buenos Aires está afectada por lineamientos de orientación ~NS, de algunos kilómetros de longitud, formados por cuencas discretas con morfología de graben, separadas entre sí por una centena de metros. Estas cuencas tienen geometrías ovaladas, con eje mayor paralelo a la dirección del lineamiento, de largo de entre 15 y >50 m de longitud, anchos de entre 10 y 25 m, y profundidades de <1,5 m. En el interior de estas cuencas, se reconocen hasta 5 tipos distintos de bolsones salinos (*saline pocket*, Brown et al., 2019), diferenciados principalmente por su morfología y tamaño (decímetros a algunos metros de diámetro), denominados SL, BF, BB, E y SR, respectivamente. Siguiendo a Cameron et al. (2002, 2004 y 2005), Brown et al. (2019 a,b) y Palacios et al. (2005), se intenta determinar si estos bolsones salinos precipitaron de fluidos que ascendieron por fracturas que atraviesan la cobertura aluvial y, por lo tanto, si pueden tener señales geoquímicas del sustrato rocoso en profundidad. El objetivo es estudiar el potencial de los bolsones salinos para la exploración de yacimientos bajo cobertura aluvial. Se escogieron tres cuencas por la nitidez de sus rasgos geomorfológicos y la clara definición de sus bolsones salinos; se realizaron análisis geoquímicos ICP-MS de muestras extraídas del interior de sus bolsones salinos. Para contrastar la geoquímica de estos bolsones salinos, se muestreó también la matriz fina de sedimentos que están 10 cm bajo el pavimento del desierto de las superficies aluviales, a lo largo de perfiles de 1 km de largo, perpendiculares a las cuencas. Para complementar los valores geoquímicos de *background*, se muestreó, además, un depósito de *salt pond*, un suelo salino, la matriz fina del relleno de un canal y el relleno salino de una fractura en un suelo salino que está en el borde de una cuenca. El análisis de QA-QC muestra que los elementos con concentraciones sobre/bajo el límite de detección son consistentes para la mayoría de los pares gemelos. La diferencia de concentraciones de cada elemento en los pares gemelos se correlaciona con sus diferencias de concentración de cationes mayores (Na-K-Ca). Las muestras de bolsones salinos y del relleno de fractura tienen sumas molares de cationes mayores que son dos a tres órdenes de magnitud mayores que para el resto de las muestras. Por otra parte, los bolsones salinos y en el relleno de fractura registran concentraciones de Mo, Re, Se y Te 2 a 10 veces mayores que para el resto de las muestras. Particularmente altas *-outliers-* son las concentraciones de estos elementos para los bolsones salinos de tipo SR y para el relleno de fractura. Además, los bolsones salinos y el relleno de fractura registran sumas molares de Mo, Re, Se y Te que se correlacionan positivamente con la suma molar de cationes mayores, lo que no ocurre para el resto de las muestras. Elementos como el Mo, Re, Se, Te son considerados como potenciales indicadores de la presencia de un sistema de pórfido o epitermal en profundidad, ya que son relativamente solubles y pueden ser transportados como oxianiones en ambientes alcalinos como son las aguas subterráneas del Desierto de Atacama (e.g. Cameron et al, 2004, 2010; Brown et al., 2019b). En el área de estudio, las concentraciones de Mo, Re, Se y Te de superficies aluviales y el relleno de canal probablemente resultan de las concentraciones de estos elementos en la cobertura aluvial circundante. La baja concentración de cationes mayores del depósito de *salt pond* sugiere que el agua de la cual precipitan tiene una salinidad menor que aquella que originó los bolsones salinos y el relleno de fractura. El *salt pond* presenta concentraciones de Mo, Re, Se y Te particularmente bajas, porque precipita por la evaporación de aguas de escorrentía torrencial apozadas, cuya baja salinidad no permite la incorporación de grandes concentraciones de estos elementos desde el medio aluvial circundante. Por el contrario, los bolsones salinos y el relleno de fractura tienen altas concentraciones de cationes mayores y de Mo, Re, Se y Te porque precipitan de aguas de alta salinidad, de origen probablemente subterráneo. Estos resultados sugieren que los bolsones salinos, en particular los de tipo SR y los rellenos de fracturas en la cobertura aluvial próximas a las cuencas, son una promisoría herramienta de exploración de yacimientos bajo la cobertura aluvial de la Pampa Buenos Aires.

Palabras Clave: bolsones salinos, exploración bajo cobertura de gravas.

Financiamiento: Agradecemos a Compañía Minera Guanaco por el financiamiento del presente trabajo.

Referencias:

- Brown A. E.; Winterburn P. A.; Bissig T., 2019a. Identification of the expression of earthquake-induced surface flooding by groundwater using detailed regolith mapping at the buried Atlántida Deposit, northern Chile. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 19 (4): 474–486. <https://doi.org/10.1144/geochem2018-064>
- Brown A. E.; Winterburn P. A.; Bissig T., 2019b. Geochemical signature of earthquake-induced surface flooding by mineralized groundwater over the buried Atlántida deposit, northern Chile. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 19 (4): 487–500. <https://doi.org/10.1144/geochem2018-065>
- Cameron, E.M., Leybourne, M.I. & Kelley, D.L. 2002. Exploring for deeply covered mineral deposits: Formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwater. *Geology*, 30, 1007–1010, <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Cameron, E.M., Hamilton, S.M., Leybourne, M.I., Hall, G.E. & McClenaghan, B.M. 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4, 7–32, <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>
- Cameron, E.M. & Leybourne, M.I. 2005. Relationship between groundwater chemistry and soil geochemical anomalies at the Spence copper porphyry deposit, Chile. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5, 135–145, <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-064>
- Palacios, C., Guerra, N., Townley, B., Lahsen, A. & Parada, M. 2005. Copper geochemistry in salt from evaporite soils, Coastal Range of the Atacama Desert, northern Chile: an exploration tool for blind Cu deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5, 371–378, <https://doi.org/10.1144/1467-7873/05-075>

Formación de regolitos residuales mineralizados en la Cordillera de la Costa en los Andes del centro y sur de Chile (35-37°S)

Paulina Judith Vergara Torrejón¹, Tomás Roquer¹, Nicolás Bustos¹, Katherine Toro¹, Carlos Marquardt¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Minería, Escuela de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

En la zona centro-sur de los Andes, entre los 35 y 37 °S, en la Cordillera de la Costa, cuyas condiciones climáticas se clasifican como templado con verano seco, afloran diversas unidades litológicas que han desarrollado regolitos. En el flanco occidental de la Cordillera de Nahuelbuta, a la latitud de Concepción, se pueden apreciar rocas Paleozoicas metamórficas de las Series Oeste y de la Serie Este. Estas rocas metamórficas se encuentran intruidas por granitoides del Carbonífero. Sobre ambas unidades sobreyacen depósitos sedimentarios Triásicos. De manera local se observan intrusiones de rocas hipabisales del Triásico. En esta área se han observado zonas con desarrollo de regolito con potencias variables, sobre los que se han desarrollado, en algunos casos, pediplanicies que actualmente albergan depósitos minerales que suscitan interés económico, como bauxitas, lateritas y depósitos de tierras raras. De esta forma, entender qué factores climáticos, litológicos, geomorfológicos, y estructurales son determinantes para la formación de perfiles de regolito que puedan albergar depósitos se vuelve un tema interesante. En este estudio se realizaron campañas de terreno para caracterizar la litología y el espesor de sus regolitos, así como para realizar una caracterización estructural del área. También se llevaron a cabo estudios de espectrometría y gravedad con métodos geofísicos, a partir de los cuales se identificaron áreas de interés estructural que se visitaron en terreno. A partir de las muestras tomadas en terreno se hicieron análisis geoquímicos de roca total, dataciones y estudios petrográficos, con los que se pudo confirmar la caracterización litológica del terreno, así como obtener edades para estas unidades litológicas. Finalmente, a partir de información de sensores remotos se realizaron análisis geomorfológicos para determinar áreas con desarrollo de pediplanicies, utilizando para ello parámetros de rugosidad y pendiente. Resultados preliminares indican que los granitoides del Carbonífero, cuyas edades tienen rangos entre 330 – 310 Ma (dataciones U/Pb en circones), con huella geoquímica de arco volcánico y syncolisional, corresponden a la litología que es más favorable para el desarrollo de regolitos, dado que las potencias de regolitos desarrollados en este tipo de litologías son del orden de cientos de metros. Las rocas hipabisales del Triásico, cuyas edades varían entre 230 – 215 Ma (dataciones U/Pb en circones), cuya huella geoquímica indica ambiente de intraplaca, también permite el desarrollo de regolitos, en menor medida, con potencias que son del orden de decenas de metros. Por otro lado, las rocas encontradas en las cuencas sedimentarias del Triásico y las rocas metamórficas del Paleozoico reportan potencias de regolito en general de menos de 20 metros. A partir de estos resultados, concluimos que la formación de regolitos residuales está controlada por: 1.- las condiciones climáticas imperantes en el área; 2. la litología; 3. las características geomorfológicas de la zona; y 4. los elementos estructurales presentes. El factor climático es el más importante, dado que en una determinada área se puede tener litología, geomorfología y estructuras que favorezcan el desarrollo de regolito, y aun así no desarrollar regolito, puesto que el factor climático determina el desarrollo de estos. La litología influye en gran manera, puesto que, como se infiere, los tipos de rocas graníticas permiten el desarrollo de perfiles de regolito de cientos de metros, mientras que rocas metamórficas, hipabisales o sedimentarias, solo de decenas de metros. También es necesario que exista un desarrollo de elementos geomorfológicos y estructurales que permitan el desarrollo de regolitos, lo que se ve propiciado por la existencia de redes de drenaje y fallas, por ejemplo, ya que estos elementos facilitan la alteración de las rocas y su posterior mineralización. De esta forma, es crucial tener en cuenta la influencia de estos factores en la exploración de recursos económicos hospedados en regolito.

Palabras Clave: Cordillera de la Costa, Depósitos minerales, Regolito.

Financiamiento: Pontificia Universidad Católica de Chile y DICTUC.

Tecnología ShovelSense® para Clasificación de variables geometalúrgicas en Mina Teck Carmen de Andacollo

Miguel Carrera¹, Víctor Araya², Jorge Correa¹, Martin Bradshaw³

(1) MineSense Technologies, Business Development, Santiago, Chile

(2) Carmen de Andacollo, Departamento de Geología, Camino a Chepiquilla s/n Casilla 3, Andacollo, Chile

(3) MineSense Technologies, Geoscience, Vancouver, Canadá

Teck Resources Limited está implementando desde hace ya algunos años un fuerte programa global de incorporación tecnológica, tanto de desarrollo propio como también de empresas líderes en tecnología minera. Es así como la operación Teck Carmen de Andacollo ha implementado un revolucionario sistema desarrollado por la empresa MineSense Technologies Ltd, que permite mejorar considerablemente la selectividad de los equipos de carguío en las frentes de bancos, reduciendo la cantidad de mineral perdido en botaderos y eliminando el estéril que diluye el mineral destinado al procesamiento.

Esta tecnología llamada ShovelSense® consiste en sensores que se instalan en el balde de palas de producción y/o cargadores frontales, sin afectar la capacidad de carga del balde ni el espacio ocupado por la máquina. El sistema está basado en el análisis de fluorescencia de rayos X que determina la ley del material, litología, mineralización y clasifica cada carga en tiempo real, a medida que las rocas fluyen hacia el balde. Las lecturas de alta resolución de leyes ShovelSense® están acopladas a un sistema satelital de navegación global de alta precisión (HPGNSS) para proporcionar la posición exacta y la ley del balde para cada equipo de carguío en la mina. La alta capacidad de selección de este sistema en las frentes de carguío, su clasificación de alta resolución, integrada estrechamente a los sistemas de gestión de flotas, permite tomar decisiones de rutas inteligentes dirigiendo los camiones al destino correcto. Esta resolución que antes no estaba disponible ahora mejora de forma importante la eficiencia, la sostenibilidad y la rentabilidad de las operaciones mineras. Teck Carmen de Andacollo es la primera faena minera en Sudamérica en instalar ShovelSense® y capturar estos beneficios comprobados, generando valor adicional a través de la optimización de los planes mineros de Corto Plazo y la generación de una mejor calidad de minerales destinados a proceso.

A medida que el uso de ShovelSense se vuelve más maduro y más ampliamente adoptado dentro de la industria, se pueden extraer nuevos casos de uso y beneficios del inmenso conjunto de datos generado por ShovelSense. Al fusionar los parámetros del modelo de bloques de la mina con los datos del balde de ShovelSense, se pueden realizar mejoras adicionales en el procesamiento y la selectividad. Los datos del modelo de bloques pueden incluir litología, dureza, zona mineral, mineralización, variables metalúrgicas y variables geotécnicas, entre otras. Estas variables geometalúrgicas reflejan las características de los depósitos de mineral y afectan la forma en que se procesa y recupera el mineral. De manera similar, el inmenso conjunto de datos generado por ShovelSense se puede usar potencialmente para predecir variables geometalúrgicas a escala de balde junto con estimaciones de ley de metal. Mediante el uso de aprendizaje automático y un algoritmo de agrupamiento supervisado, el espectro ShovelSense puede proporcionar una mayor comprensión de la litología, la composición mineral, la dureza y otras características del material que afectan el lugar donde se mueve el material y cómo se procesa. La mina Carmen de Andacollo en Chile está trabajando con MineSense para mejorar las decisiones de enrutamiento al fusionar ShovelSense y los datos del modelo de bloques y predecir los valores geometalúrgicos a nivel de cubeta usando ShovelSense. Aunque todavía está en desarrollo, utilizando un algoritmo en la nube MineSense y configurando manualmente ciertas variables metalúrgicas, ya es posible aplicar una ley de corte por tipo de material y enrutar el material en consecuencia. Esta solución identifica si el material debe enviarse directamente a la planta, al vertedero de residuos o si cumple con los criterios para ser mezclado antes de enviarse a la planta.

Palabras Clave: selectividad, optimización, Teck, ShovelSense, geometalurgia.

Mejores prácticas en la Caracterización Geometalúrgica de un proyecto de Exploración Avanzada

Patricio Cuadra Cárdenas¹

(1) Consultor independiente

1. INTRODUCCIÓN

La base de información de un proyecto de exploración avanzada de un cuerpo mineralizado del tipo pórfido cuprífero, de 0,5 a 1 km de ancho, 2 a 3 km de longitud y una extensión vertical de 300 a 1.000 m, en cifras aproximadas, pasa de un reconocimiento mediante sondeos espaciados en una etapa básica a una malla de información sistemática de 200 m en secciones espaciadas entre 200 a 400 m, lo cual implica la perforación de 50.000 a 100.000 m de sondeos con recuperación de testigos.

Los objetivos principales de la fase de exploración avanzada es la caracterización geocientífica de la zona de mayor interés económico y la delimitación global de los bordes del depósito, de manera de dimensionar en cantidad y calidad los recursos de mineral y la calidad de las zonas adyacentes de menor ley, lo cual impactará en el resultado del estudio de viabilidad técnico-económico del proyecto.

Al mismo tiempo que los sondeos permiten conocer la extensión del cuerpo mineralizado y contenido de elementos de interés, se deben obtener datos para realizar una caracterización geotécnica y geometalúrgica de carácter global, lo que permite adelantar su comportamiento ante procesos de extracción y tratamiento metalúrgico del mineral, variables que constituyen factores modificantes para la conversión de recursos en reservas minerales.

La calidad de estas caracterizaciones está basada en la obtención de muestras representativas de las principales unidades geológicas que conforman el cuerpo mineralizado, la correcta ejecución de pruebas de laboratorio y su interpretación basada en el modelo geológico del depósito, todo lo cual debe cumplir con los estándares de calidad, trazabilidad y auditabilidad requeridos por el proyecto en esta etapa.

Es fundamental que el personal involucrado en todas las etapas cuente con la capacitación técnica, de seguridad y cuidado del medio ambiente para ejecutar el proyecto, al mismo tiempo que todas las operaciones estén descritas en detalle en procedimientos técnicos.

2. OBJETIVO

El presente trabajo resume las principales actividades consideradas en el diseño y control de una campaña de captura de información para la caracterización geometalúrgica de un proyecto de exploración avanzada en un depósito del tipo pórfido cuprífero.

3. ACTIVIDADES

3.1. Programa de muestreo y calidad de muestras

Se debe procurar que la cantidad, distribución y calidad de las muestras represente en forma adecuada las principales unidades geológicas que controlan la distribución e intensidad de la mineralización de interés y los parámetros de comportamiento en términos de dureza y recuperación metalúrgica.

La longitud del soporte de muestreo es un elemento crítico y debe ser el mismo para todas las muestras, de manera que puedan ser comparables entre sí para fines estadísticos. Este soporte debe compatibilizar la mayor homogeneidad geológica posible, lo que implica un largo limitado por la heterogeneidad del cuerpo mineralizado, con la obtención de masa necesaria y suficiente para la ejecución de todas las pruebas metalúrgicas y controles del programa de pruebas metalúrgicas. Para un desarrollo integral de las pruebas se requiere muestras de sondeos diamantinos de diámetro mayor que N (47,6 mm de diámetro), tal que permita un soporte reducido para lograr la masa requerida.

3.2. Programación y ejecución de pruebas metalúrgicas

El programa de pruebas metalúrgicas es función del tipo de proceso minero-metalúrgico considerado para el proyecto y debe incluir todas las pruebas y estudios necesarios para lograr una adecuada caracterización física, química, mineralógica y metalúrgica de cada unidad definida. La Figura 1 muestra un diagrama de flujo de procesos para el caso del tratamiento de un cuerpo mineralizado con sulfuros de cobre, lo que implica chancado, molienda, concentración por flotación y disposición de relaves.

De acuerdo con las mejores prácticas de la industria (Codelco Chile, 2019), el programa debe considerar una primera etapa de pruebas exploratorias a realizar sobre un 20% de las muestras, con el objetivo de definir las condiciones óptimas de granulometría (P80) y tiempo para el resto de las muestras. Se debe verificar que la selección de estas primeras muestras a ensayar, cubren el mayor espectro posible de comportamiento, tanto en conminución como en flotación.

La ejecución del programa requiere un estrecho seguimiento y control por parte del profesional a cargo de la geometalurgia del proyecto, contando con la asesoría y dirección de la unidad experta centralizada de la empresa.

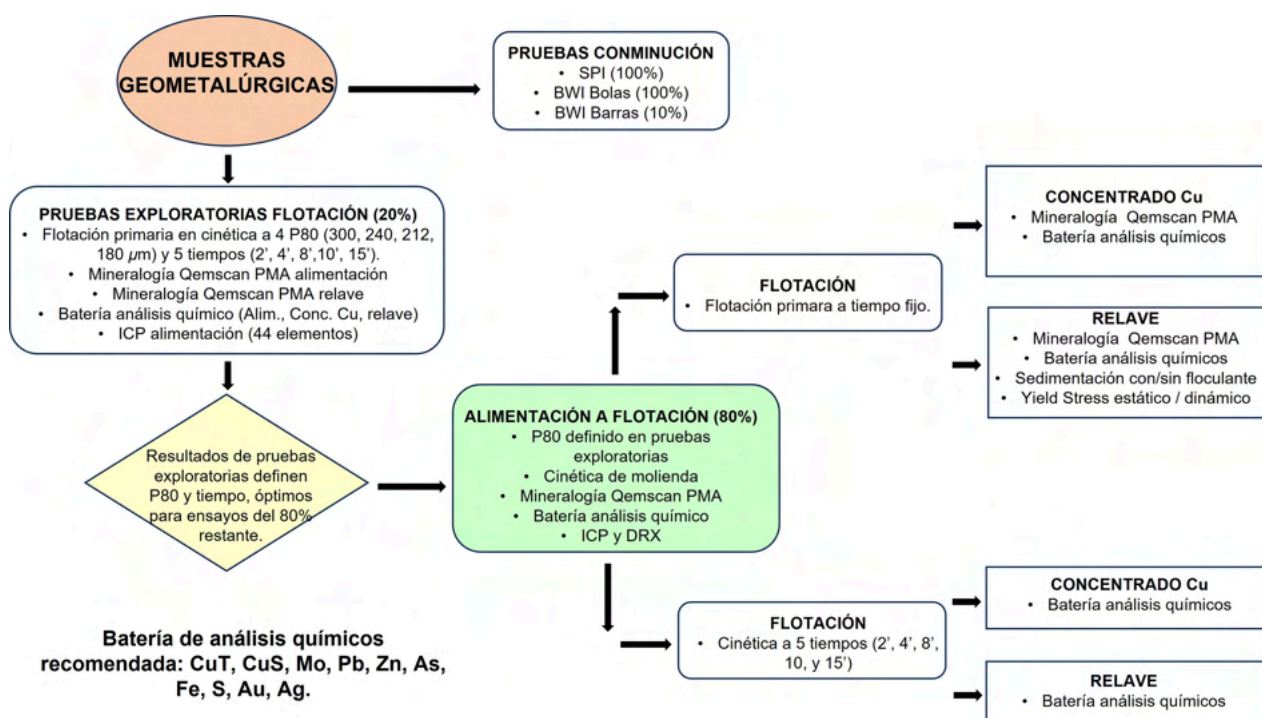


Figura 1. Diagrama de flujo de pruebas metalúrgicas para la caracterización de un proyecto de exploración avanzada.

Se debe asegurar la cadena de custodia de las muestras, submuestras y productos, de manera de evitar confusiones, cruces o pérdidas de muestras y su documentación durante el proceso, manteniendo un riguroso protocolo de identificación, ordenamiento y almacenamiento temporal de muestras, submuestras, productos y preparaciones. La documentación de los procedimientos, condiciones y resultados, tanto en formato físico como digital, deben estar disponibles en línea en los repositorios dispuestos por la empresa para estos efectos.

Se debe verificar la ejecución y resultados de los controles de calidad definidos en cada etapa y la entrega oportuna de informes de avance e informe final de resultados de laboratorios.

Finalmente, se debe revisar que todas las muestras, submuestras, productos y preparaciones sean devueltas a los lugares definidos por la empresa, acompañados de sus respectivos inventarios.

3.3. Recuperación y corte de testigos

La recuperación de testigos debe ser por sobre 80%, particularmente por sobre 90-95% en zonas primarias, con la excepción de zonas de mala calidad geotécnica.

El corte de testigos para análisis químicos debe realizarse con sierra en zonas de buena calidad y con guillotina hidráulica en las de mala calidad. Se debe mantener el control de la representatividad de las muestras asegurando que el corte produzca dos mitades equivalentes, mediante control por peso y supervisión geológica directa, registrando en línea estos datos y corrigiendo de inmediato si se detectan desviaciones en la operación.

En operaciones mineras es posible diseñar sondajes para ser utilizados íntegramente en pruebas metalúrgicas o bien seleccionar tramos de sondajes geológicos a procesar mediante conminuciones sucesivas controladas para permitir su uso en pruebas de dureza (SPI, BWI, etc.), sin sacrificar la mitad de testigo almacenada en bandejas, lo que supone un conocimiento más acabado del yacimiento, situación que no es la de un proyecto de exploración.

3.4. Caracterización geológica y geotécnica previa

Previo al corte de testigos se debe obtener fotografías ortogonales digitales de alta resolución de los testigos enteros, evitando el brillo mediante iluminación oblicua, debidamente rotuladas, con escala y tabla de colores de referencia.

También se debe realizar el levantamiento de parámetros geotécnicos (RQD, FF, molido), el mapeo de celdas y la obtención de probetas para ensayos geotécnicos antes del corte.

Los sondajes deben ser mapeados en detalle (escala 1:100 o 1:200) a testigo entero o mitad, registrando sus características geológicas en sistema digital, a soporte natural independiente para los parámetros de litología, estructuras, alteración y mineralización. Este último debe ser contrastado una vez que se cuente con los resultados de un análisis químico.

Con esta información se construye un modelo geológico 4D, incluyendo las unidades litológicas, estructuras mayores, zonas de alteración y zonación de sulfuros y una caracterización de unidades geotécnicas del cuerpo mineralizado y zonas adyacentes.

Sobre la base del modelo geológico y de los resultados de análisis químicos de los sondeos se realiza el análisis estadístico y geoestadístico para definir las unidades de estimación de cobre y proceder a la construcción del modelo de bloques y la estimación de recursos del proyecto.

3.5. Caracterización geometalúrgica

En base a toda la información mencionada en el punto anterior, se definen unidades geometalúrgicas preliminares, que consideren una cierta homogeneidad litológica, estructural, mineralógica y de leyes. Para cada unidad considerada relevante, se definen los intervalos de los sondeos a ser muestreados para ensayos de conminución y flotación. Las muestras deben ser de una homogeneidad controlada y no corresponder a mezclas de unidades de comportamiento distinto, ya que esto puede distorsionar los resultados en algunos casos, ni singularidades estructurales, excepto que esto constituya un objetivo particular.

Se realiza un registro fotográfico y geológico de detalle de cada tramo seleccionado, de manera de comprobar la representatividad de éste, además de dejar documentado el tramo que será retirado de la bandeja de almacenamiento.

Se envían al laboratorio las muestras compuestas para los tramos seleccionados, debidamente identificadas para la realización de las pruebas y caracterizaciones programadas. Los resultados de estos estudios deben ser rigurosamente documentados mediante archivos digitales y físicos, de acuerdo con lo requerido por la empresa, la cual realiza los análisis de la calidad de los resultados, solicitando al laboratorio confirmación o corrección de datos, repetición de ensayos, etc. en los casos que se requiera.

Una vez terminadas todas las pruebas metalúrgicas y caracterizaciones químicas y mineralógicas y aceptados los controles de calidad, se realiza el análisis estadístico de los resultados, con el objetivo de confirmar, segregar o agrupar las unidades preliminares en unidades geometalúrgicas finales.

Como una manera de sintetizar la información, se recomienda elaborar fichas descriptivas de cada muestra geometalúrgica, incluyendo lo siguiente:

- Identificación y ubicación de la muestra
- Descripción geológica general
- Litología/Textura
- Alteración dominante, más los volúmenes específicos de sericita gris, sericita blanca y arcillas
- Mineralización: que incluye a los principales minerales sulfurados de cobre, en orden de abundancia
- Leyes medias: Cu (%), Mo (ppm), etc.
- Estructuras: Tipo, mineralogía, volumen y ángulo de vetillas. También se incluyen en este ítem, estructuras tipo veta de alta ley/sulfuros.
- RQD promedio
- Observaciones
- Además, en cada ficha se incluye información gráfica correspondiente a:
 - Ubicación de muestra en sección, con modelo de parámetro geológico seleccionado.
 - Soporte efectivo de la muestra (proyección ortogonal del tramo con respecto a la actitud estructural predominante), en metros
 - Gráfico de leyes, según soporte
 - Gráfico RQD, según soporte
 - Gráfico mineralogía de mena y volumen total de sulfuros, según soporte.

De modo complementario a lo anterior, se agrega un archivo fotográfico de los testigos de sondeos y un striplog del mapeo geológico con todas sus variables correspondientes al tramo definido.

Toda la información obtenida para cada muestra geometalúrgica es compilada en carpetas física y digital, de manera de asegurar su plena trazabilidad y auditabilidad.

Finalmente, se elabora un informe explicativo detallando el proceso completo, los resultados obtenidos y la caracterización geometalúrgica final del proyecto, destacando dónde se encuentran las bases digitales y físicas de la información.

CONCLUSIONES

En este resumen se exponen en forma general la secuencia que debe seguir el proceso de obtención y el análisis de datos para obtener una caracterización geometalúrgica de un proyecto de exploración, cuyo detalle debe estar contenido en los procedimientos técnicos correspondientes a cada actividad, las cuales deben ser adecuadas a la etapa del proyecto y sus características geológicas.

Dado que la caracterización geometalúrgica debe proyectar la información geocientífica hacia los ámbitos del proceso de negocio, requiere la participación activa de profesionales especialistas durante el desarrollo del proyecto, tempranamente desde la etapa de planificación hasta la entrega final, incluyendo la fase posterior de resolución de consultas.

La adecuada realización de esta actividad se basa en la asertividad y claridad de los procedimientos y en contar con personal debidamente capacitado en las distintas operaciones que involucra, de manera de obtener resultados de calidad, trazabilidad y auditabilidad que aseguren el mejor rendimiento de la inversión efectuada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación de Alejandra Araneda M., geóloga especialista en geometalurgia, con quien se desarrollaron los análisis de la información de un proyecto de exploración avanzada, sobre lo cual se efectuó el diseño de los procedimientos resumidos en el presente trabajo.

Palabras Clave: caracterización geometalúrgica, exploración avanzada, pórfido cuprífero.

Referencias:

- Codelco Chile (2019) Guía Corporativa de Geometalurgia, enero 2019.

Modelamiento de variables geometalúrgicas a partir de imágenes de roca intacta

Pía Lois Morales¹⁻³, Javier Jerez², Hugo Bart¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

La tecnología de herramientas de caracterización para estudiar las unidades geológicas en minería ha avanzado enormemente en las últimas décadas. En el contexto del estudio mineralógico, la observación de la mineralogía por medio de óptica ha sido complementada con la microscopía automatizada y el análisis de imágenes de las fotomicrografías, la automatización de la microscopía de barrido y el desarrollo de tecnologías como QemSCAN o TIMA e incluso la aplicación de microtomografía de rayos X para el estudio tridimensional de fases minerales. Por otra parte, a mediana escala (i.e. sondajes) se ha avanzado desde la observación visual e interpretación del geólogo al uso de imaginería de alta resolución (HD) y también el uso de tecnologías espectrales de mapeo tales como Hylogger o Corescan para obtener información semicuantitativa de la composición y distribución mineral. Recientemente incluso, el uso de la microtomografía ha sido aplicada en sondajes por medio de la tecnología desarrollada por OreExplore. Es esperable entonces que las tecnologías asociadas a la caracterización mineral sigan mejorando en los próximos años.

La extracción de información de alta resolución de los materiales rocosos ya sea a escala de macizo rocoso, sondaje o partícula de roca, trae consigo varios desafíos y oportunidades. Desafíos tales como el manejo de datos, almacenamiento, control de calidad y oportunidades como el uso de la información para la mejor toma de decisiones en minería, ya que las características geológicas de las rocas afectan los procesos mineros desde la extracción hasta la recuperación de agua de relaves. Si bien herramientas de *data science* como *machine learning* y inteligencia artificial ayudan con el manejo de los datos, es también importante utilizar la información para entender la fenomenología de la interacción de las rocas con los procesos mineros, lo que permite mejorar las operaciones de forma proactiva en vez de reactiva, permitiendo la predicción del comportamiento de las unidades antes de su extracción y testeo.

En este trabajo, se presentan dos aplicaciones sobre la información de roca intacta extraída de cortes transparentes para la determinación de variables geometalúrgicas por medio de un algoritmo que simula un proceso de fragmentación sobre la roca intacta considerando variables físicas mediante un modelo fenomenológico. La primera aplicación, corresponde a la simulación de variables de resistencia y su aplicación para la predicción de variables extraídas de los test de impacto para conminución (Axb). La segunda aplicación corresponde a la simulación de la liberación mineral por medio la simulación de la fractura de la roca de forma aleatoria y no aleatoria.

Los resultados de ambas aplicaciones muestran que el uso de la información geológica en combinación con un entendimiento de la fenomenología de la interacción de la roca con el proceso minero permitiría utilizar la información de roca intacta para determinar el rendimiento del material, expresado en KPIs como energía a consumir, tonelaje, liberación, potencial de recuperación y ley de concentrado antes de que el material sea procesado. Esta información también permitiría adelantarse en las acciones si las unidades son problemáticas. Hasta el momento, estos modelos han sido aplicados en información extraída de SEM-automatizado a escala de corte transparente, pero muestran la potencialidad de darle mayor valor a la información geológica de caracterización, que permita tomar decisiones estratégicas y tácticas en el desarrollo de los planes geometalúrgicos contribuyendo a una minería más eficiente.

Palabras Clave: mineralogía de procesos, liberación, energía específica, dureza.

Financiamiento: Chilean National Research Agency (ANID) under project grants Basal AFB180004, AFB220002 and Fondecyt 11220631.

Modelamiento y estimación de variables geometalúrgicas mediante elaboración inteligente de proxies

Andrés Rivera¹, **Brian Townley**¹⁻²⁻⁴, Matías Velazco¹, Daniel Baeza³, Elías Obreque³, Nicole Reyes³, Marcelo Surjan³, Rodrigo Zarate³, Francisco Anguita³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Tupper 2007, Santiago, Chile

(3) GEA SPA - Lidenbrock, La Capitanía 80 Ofc. 108, Santiago, Chile

(4) Geo Analytical Vision S.A., Avda. Ricardo Lyon 3547, of. 202, Santiago, Chile

Para la optimización de los procesos de explotación y procesamiento de minerales es crucial lograr una detallada caracterización de las propiedades de los yacimientos, entre estos la estimación de recursos y los modelos geológicos, geomecánicos y geometalúrgicos, todo lo necesario para lograr la determinación de reservas minerales. No obstante lo anterior, es frecuente que solamente los modelos de recursos presenten alto detalle y control de calidad, otras propiedades de los yacimientos comúnmente descritos en forma de dominios, limitados mediante contactos duros, en base a criterios cualitativos o bien con baja representatividad, basado en una distribución heterotópica de datos. Entre estos modelos caen las propiedades geometalúrgicas.

En este contexto, el índice de trabajo de Bond (BWI por su sigla en inglés) es una variable que refleja la resistencia de rocas a la fragmentación y trituración y el paso de una granulometría más gruesa a una más fina (a un 80% de paso), lo que determina la eficiencia de los procesos de extracción y procesamiento de minerales. Es de gran interés tener estimaciones precisas de esta variable y con esta información diseñar procesos de explotación y molienda óptimos, esto para disminuir los consumos de energía y tiempo de residencia asociados, aumentar los ciclos de vida de los equipos, y optimizar la liberación mineral, el objetivo principal de la conminución. El problema que existe para la caracterización y modelamiento de la moliendabilidad de las rocas es la baja densidad de muestras existentes, esto debido al soporte muestral requerido para este ensayo y los costos asociados. En este sentido es común encontrar que la data de ensayos de BWI no refleja más de un diez por ciento de las muestras totales tomadas para la determinación de leyes y geoquímica (y empleadas en la estimación de recursos), y no presentan una distribución sistemática. Si a lo anterior se agrega que BWI no es una variable aditiva, se concluye que no es posible evaluar la variabilidad espacial de la dureza metalúrgica, lo que obliga a asignar esta caracterización a dominios, definidos por propiedades geológicas, determinadas mediante variables cualitativas, por lo que la incertidumbre de estas se traslada a la determinación de unidades geometalúrgicas. Dicha incertidumbre se traslada entonces al modelo de reservas, el que combina un modelo de recursos de alta resolución y confianza, con un modelo geometalúrgico que carece de la misma certeza y calidad.

Para efectos de asistir en la problemática descrita, se presenta en este trabajo una metodología para la estimación de variables geometalúrgicas a partir de otras variables de alta certeza y densidad de distribución, y la imputación de estos mediante ecuaciones interpretables y la creación de variables proxy. Esta metodología permite al experto evaluar e interpretar las relaciones entre una variable objetivo, BWI en este caso, y variables de entrada de mayor densidad en el conjunto de datos, geoquímica por ejemplo. Las ecuaciones obtenidas son combinaciones de las variables de entrada usando operadores matemáticos que maximizan la correlación con la variable objetivo y también la ganancia o peso de cada una de las variables seleccionadas, generando además de una variable de alta correlación, una variable representativa de la variable de interés que está en los mismos rangos de operación.

Para validar esta metodología mostraremos un caso de estudio con un conjunto de datos reales de 7.968 muestras, con solo 1.456 datos de BWI. Usando esta metodología el experto puede generar datos BWI estimados y llevar la representación al total de las muestras con valores validados y altamente correlacionados con el fenómeno. Con este caso es posible entender los alcances de la metodología, permitiendo al experto, además de tener una mejor interpretación del fenómeno, modelar la distribución espacial de BWI en alta resolución y vincular esta propiedad con la geología del yacimiento, generando de esta forma, estimaciones predictivas que pueden ser integradas con las estimaciones de recursos y otras variables, e integradas en un modelo de bloques.

Palabras Clave: Geometalurgia, Recursos Minerales, Reservas Minerales, Inteligencia Artificial, Modelamiento.

Tecnología ShovelSense® para la Optimización del plan de corto plazo en Mina Teck Quebrada Blanca 2

Miguel Carrera¹, Martin Bradshaw³, Rodrigo Castagno²

(1) MineSense Technologies, Business Development, Santiago, Chile

(2) Quebrada Blanca, Geociencias, Santiago, Chile

(3) MineSense Technologies, Geoscience, Vancouver, Canadá

Teck Resources Limited está implementando desde hace ya algunos años un fuerte programa global de incorporación tecnológica, tanto de desarrollo propio como también de empresas líderes en tecnología minera. Es así como la operación Teck Quebrada Blanca 2 ha implementado un revolucionario sistema, que permite mejorar considerablemente la selectividad de los equipos de carguío en las frentes de bancos, mejorando el plan minero de corto plazo, principalmente reduciendo la cantidad de mineral perdido en botaderos y eliminando el estéril que diluye el mineral destinado al procesamiento.

Esta tecnología consiste en sensores que se instalan en el balde de palas de producción y/o cargadores frontales, sin afectar la capacidad de carga del balde ni el espacio ocupado por la máquina. El sistema está basado en el análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) que determina la ley del material y clasifica cada carga en tiempo real, a medida que las rocas fluyen hacia el balde. Las lecturas de alta velocidad y resolución de leyes están acopladas a un sistema satelital de navegación global de alta precisión (HPGNSS) para proporcionar la posición exacta y la ley del balde para cada equipo de carguío en la mina. La alta capacidad de selección de este sistema en las frentes de carguío, su clasificación de alta resolución, integrada estrechamente a los sistemas de gestión de flotas, permite tomar decisiones de rutas inteligentes dirigiendo los camiones al destino correcto. Esta resolución que antes no estaba disponible ahora mejora de forma importante la eficiencia, la sostenibilidad y la rentabilidad de las operaciones mineras al mejorar la clasificación de los materiales medidos en el frente de extracción optimizando los planes mineros de Corto Plazo.

La dilución y la pérdida de mineral son dos de los factores más importantes que afectan la rentabilidad de los proyectos mineros. La dilución es el material no mineral que se extrae junto con el mineral, mientras que la pérdida de mineral es el material mineral que se deja atrás o se envía a un vertedero. Ambos factores pueden aumentar los costos operativos y reducir los ingresos. El uso de XRF en baldes utilizada para escanear el material extraído y determinar su ley en tiempo real por camión, está transformando la manera de operar de las mineras, permitiendo ser más selectivos y mejorar la resolución de la información obtenida desde la frente de extracción, desbloqueando un nuevo nivel de granularidad de datos que mejora el control mineral desde el origen del proceso productivo de la mina. Esto se debe a que el bulk sorting permite obtener información más precisa sobre la composición mineral del material extraído, información que puede utilizarse para tomar decisiones más informadas sobre el destino del material, enrutando el mineral y el lastre, lo que puede ayudar a reducir la dilución y la pérdida de mineral.

Durante los meses de febrero y mayo de 2023, se realizó una prueba industrial en Quebrada Blanca donde, a principios de abril se realizó la integración con el sistema de flota, permitiendo identificar y cuantificar las potenciales reasignaciones. En este mes se observaron 2.386 camiones con capacidades de 300 toneladas. El 80% de los camiones clasificados con el modelo de corto plazo coinciden con la asignación de las mediciones de XRF en balde, mientras que un 20% de los camiones podrían haber sido reasignados a un mejor destino, optimizando el plan minero original. El 20% de las reasignaciones fueron clasificadas como 5% dilución (operacional y planificada) y 15% de recuperación de mineral de zonas de estéril (material de stock o sulfuro de alta ley). El beneficio a corto plazo de la mejora de la resolución y la selectividad durante la prueba fue el potencial aumento de la ley cabeza.

En general, el uso de técnicas más selectivas y la mejora de la resolución de la información obtenida desde la frente de extracción puede ayudar a mejorar el control mineral desde el origen del proceso productivo de la mina. Esto puede conducir a una reducción de los costos operativos y un aumento de los ingresos.

Palabras Clave: selectividad, optimización, Teck, ShovelSense.

Aplicación de Buenas Prácticas en la caracterización geocientífica del yacimiento Río Blanco, V Región, Chile

Patricio Nicolás Cuadra Cárdenas¹, Juan Hermosilla Bravo², Gonzalo Rojas Sandoval¹

(1) Consultor independiente, Santiago, Chile

(2) Exploraciones Mineras Andinas S.A.

INTRODUCCIÓN

Entre diciembre de 2003 y marzo de 2009, la División Andina de Codelco Chile ejecutó cuatro proyectos de reconocimiento de la parte profunda del yacimiento Río Blanco, los que sumaron 304 sondajes diamantinos de largo alcance, alcanzando un total de 146.600 m. Este reconocimiento tuvo por objetivo identificar y caracterizar los recursos geológicos ubicados bajo los niveles de explotación, cubriendo una extensión de 600 a 1.000 m de columna mineralizada. Los nuevos sondajes complementaron los preexistentes, permitiendo conformar una base robusta de información geocientífica en dicha parte del yacimiento, para respaldar el plan minero de largo plazo de la División y extender la vida útil de la mina.

En la ejecución de estos proyectos se aplicó un enfoque integral, que incluyó la captura, interpretación y producción de modelos en las disciplinas de geología, geotecnia, geometalurgia y estimación de recursos. De esta manera, se efectuó el registro de variables geológicas y parámetros geotécnicos del total de sondajes perforados, la ejecución de ensayos geotécnicos de laboratorio y pruebas metalúrgicas. Además de lo anterior, se efectuaron estudios complementarios mediante geoquímica multielemental, geocronología y petrocalcografía, de manera de apoyar la identificación y caracterización de los distintos eventos petrogenéticos, de mineralización y alteración que dieron origen al yacimiento.

Los autores de este trabajo desempeñaron respectivamente los cargos de Jefe de Proyectos y Superintendente de Geología, Geólogo de Proyecto y Jefe Geología Largo Plazo, Codelco Chile División Andina, durante el período de ejecución del proyecto.

METODOLOGÍAS DE CAPTURA Y MODELAMIENTO DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA

A partir del primer proyecto, se implementó un sistema de registro de información de los testigos de sondajes, generando una cartilla de mapeo normalizada de mayor detalle (escala 1:100), de acuerdo con las mejores prácticas empleadas en la Corporación. Consecuente con el detalle requerido para el mapeo geológico, se disminuyó el soporte de muestreo para análisis químico de 10 m a 2 m. Los sondajes fueron analizados por cobre total, molibdeno total, arsénico y plomo, utilizando los protocolos de aseguramiento de calidad divisionales en las etapas de preparación mecánica y análisis químicos.

El objetivo principal del nuevo sistema de mapeo fue detectar los cambios geológicos observables en términos de litología, alteración y mineralización, como variables independientes, marcando sus quiebres naturales a lo largo de los sondajes. Las primeras innovaciones incluyeron la identificación y caracterización de los tipos de vetillas, ocurrencia y cuantificación del total de sulfuros y la proporción relativa de los mismos, además de la simplificación de las unidades litológicas de 60 a 29, con énfasis en el mapeo detallado de brechas. Por su parte, durante este periodo se mantuvo el registro en intensidades en escala 1 a 5 para los minerales de alteración y ganga. Un resultado relevante de esta etapa fue la discriminación de la sericita gris de la tradicional asociación cuarzo-sericita, constituyéndose en un importante control de la ley de cobre.

Entre 2004 y 2009 se verificó un proceso de mejoramiento continuo en el proceso de captura de información, en el que participó activamente el equipo de geólogos y analistas de los proyectos, con el apoyo de los consultores Jorge Quiroga, Eugene Tobey, John Hunt y Enrique Tidy, lo que permitió enriquecer la metodología en los aspectos estructurales, geoquímicos y mineralógicos, estableciendo un proceso de captura con un estándar de alta calidad, auditabilidad y productividad, alineado con los requerimientos del negocio minero. Se introdujo el registro volumétrico (%) de la matriz de las unidades de brechas y la abundancia relativa de los tipos litológicos de los fragmentos, y de la misma forma se registraron las principales asociaciones de minerales de alteración. Junto a esto, se estructuró la secuencia temporal de vetillas, en base a la mineralogía del relleno y del halo y sus relaciones de corte que, junto a la segregación del mapeo de alteración hidrotermal en sus formas de ocurrencia selectivas (potásica de fondo, propilítica) y penetrativas (cúmulos en forma de texturas ocelares, "K-flooding", matriz y halos en brechas y vetillas), proporcionó una caracterización eficaz de los principales eventos de alteración-mineralización en el yacimiento. En base a los resultados obtenidos en los primeros modelamientos y análisis estadístico de variables, se segregaron las asociaciones de alteración destructivas de las selectivas en columnas de mapeo distintas y se cambió la escala de mapeo a 1:200, ya que se demostró que no había pérdida de información. Esto último permitió aumentar la velocidad de mapeo, lo que hizo posible abordar posteriormente el remapeo de sondajes antiguos, necesario para homogeneizar la información en toda la extensión de los recursos del yacimiento.

El registro y almacenamiento de datos de sondajes se efectuó mediante el sistema de mapeo digital impulsado por Codelco Chile en sus sucesivas versiones (GVMapper, mediante contrato con la empresa Geovectra y Sistema de Mapeo Digital (SMD), desarrollado por José Miguel Rodrigo geólogo de El Teniente, quien luego lo convirtió en un producto comercial (Xilab). El repositorio digital de información geológica y análisis químicos utilizado fue la base de datos BDGEO y, posteriormente, acQuire.

La definición espacio-temporal de los eventos de alteración y mineralización fue apoyada por estudios petrocalcográficos efectuados por Enrique Tidy, siguiendo un esquema metodológico desarrollado por el proyecto y por estudios geocronológicos, mediante las metodologías U/Pb, Re/Os y Ar/Ar, realizados por la Dra. Katja Deckart en una primera etapa y por Alfredo Bertens en una segunda. Las estimaciones de recursos fueron realizadas con el apoyo del consultor Sr. Jeff Sullivan.

En todos los procesos de captura de datos se aplicaron sistemas de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), de manera de garantizar la calidad, trazabilidad y auditabilidad de éstos. Todos los procedimientos técnicos fueron documentados formalmente, constituyendo el estándar de la División: planificación de sondajes, instalación de las sondas en terreno, obtención y manejo de los testigos de sondajes, mediciones geotécnicas, obtención de probetas para ensayos, preparación mecánica de muestras para análisis químicos, análisis químicos, mapeo geológico de los testigos y obtención y caracterización de muestras para pruebas metalúrgicas y estudios de laboratorio.

En particular, el QA/QC aplicado en el mapeo geológico de sondajes incluyó las siguientes actividades en línea: inducción profesional nuevo, asignación aleatoria de sondajes, alineamiento mapeo/modelamiento, revisiones expertas, control de coherencia con sondajes cercanos, duplicados de mapeo, análisis estadísticos de consistencia de ley visual/química, litología y alteración, estudios especiales (petrocalcografía, DRX, Espectroscopía IR, FRX, QemScan, etc.).

MODELAMIENTO GEOLÓGICO. EVENTOS DE ALTERACIÓN/MINERALIZACIÓN

Los resultados más relevantes del análisis y modelamiento de la información geológica consistieron en la descripción detallada de los eventos de alteración, que se expresan como asociaciones de minerales ocurriendo en diferentes tipos de vetillas y/o en la matriz de las rocas, en una mejor discriminación de rocas intrusivas y brechas, sumado al ordenamiento espacio-temporal de todo el sistema, todo lo cual permitió identificar y estimar su impacto en el control de la intensidad y distribución de la mineralización de cobre y molibdeno en el yacimiento.

Se identificaron de forma sistemática 7 tipos de vetillas, que ocurren típicamente en los sistemas pórfidos cupríferos, 3 de ellas tempranas (EB, EDM/EBT-SV y A), 2 transicionales (B y C) y 2 tardías (D y E); 7 tipos de brechas de origen ígneo o hidrotermal, estas últimas caracterizadas por la abundancia relativa de turmalina, biotita, polvo de roca, cuarzo, feldespato potásico, anhidrita o hematita; y se caracterizaron 12 asociaciones de alteración, 3 de ellas de fondo (biotítica, biotita-clorita y clorita-epidota), 4 del tipo selectiva (cuarzo-sericita, sericita gris verde, albita y arcillas) y 5 del tipo penetrativa (biotítica, feldespato potásico, sericita gris verde, cuarzo-sericita y arcillas). El Análisis integrado de toda la información, permitió definir la ocurrencia de al menos 5 eventos significativos de alteración/mineralización en el yacimiento (Tabla 1).

Tabla 1. Eventos de Alteración/Mineralización Yacimiento Río Blanco.

Evento	Alteración/Vetillas	Mineralización	Edad (Ma) Re/Os (Mo)	Litología	Edad (Ma) U/Pb (Circón)
Potásico de Fondo	Biotitización de ferromagnesianos / EB	Cpy >>Py, TS bajo	-	PQM-1	7,31 A 6,48** (mínima)
Potásico Temprano	Destructiva en vetillas e intensa en fragmentos de brechas tempranas (BXT-BXB)/EDM ser verde - A	Cpy - Bn, TS alto	6,59 a 6,38 #		6,99±0,06; 6,52±0,36; 6,81±0,03
Transicional sericita gris	Sericita gris / B y C	Cpy >> Py, TS alto	6,10 a 5,76 #	PQM-2	5,84±0,06 Ma; 6,00±0,03; 6,05±0,02*
				PFELD	5,6 a 5,9*
Potásico - transicional tardío	Destructiva en vetillas en bajo volumen / EDM - Sericita verde - A - B - C	Cpy - Bn, TS bajo	5,0 a 4,8 #	PDL(Pfeld)	5,6 a 5,3*
				PDL(Pfeld)	5,3 a 4,9*
Tardío	Destructiva Qtz-Ser y selectiva argílica en pórfidos tardíos y chimeneas subvolcánicas y argílica	Py - Cpy, TS alto, localmente En-Ten-Ga y Esf	-	CHDAC	4,8 a 4,9*
			-	CHRIOL	4,9 a 4,3*

BXT = Brecha de turmalina; **BXB** = Brecha de biotita; **BXHEM** = Brecha hematítica; **PQM** = Pórfido cuarzo-monzonítico; **PFELD** = Pórfido feldespático; **PDL** = Pórfido Don Luis; **CHDAC** = Chimenea dacítica; **CHRIOL** = Chimenea riolítica. Vetillas: nomenclatura convencional. **Qtz** = cuarzo; **Ser** = sericita; **Cpy** = calcopirita; **Py** = pirita; **Bn** = bornita; **En** = enargita; **Ten** = tennantita; **Ga** = galena; **Esf** = esfalerita. **TS** = total sulfuros.
 Métodos: # N-TIMS; * U/PB CA-TIMS; ** U/Pb SHRIMP-CA-TIMS

Los recursos minerales del yacimiento Río Blanco se distribuyen en tres cuerpos principales, de norte a sur, Río Blanco, Don Luis y Sur Sur, cada uno de los cuales evidencia una particular distribución de eventos geológicos, por lo que su caracterización se realiza en forma separada. El modelo geológico se construyó a escala 1:2.000 mediante secciones transversales espaciadas cada 60 m, controladas con plantas espaciadas cada 16 m (desde el nivel 8 hasta el 17) y en la zona profunda del yacimiento, donde se disponía de menor densidad de información, con plantas de los niveles 20 (cota 3.020 m s.n.n.), 23 (cota 2.870 m.s.n.m.) y 30 (cota 2.520 m.s.n.m.) en los tres cuerpos, transfiriendo estos modelos 2D a 3D en el software Vulcan. A partir de 2009, este proceso fue realizado mediante el software Leapfrog Pro.

CONCLUSIONES

El proceso de mejoramiento de las metodologías geocientíficas de captura, procesamiento de información y modelamiento llevado a cabo por el equipo de los proyectos de reconocimiento geológico de la parte profunda y sectores marginales de yacimiento Río Blanco y sus productos están documentados en detalle en los informes internos finales de los proyectos y presentados parcialmente en varias publicaciones previas (Cuadra, 2011, Hermosilla y otros, 2011, Hermosilla, 2015).

La entrega final del nuevo modelo geológico del yacimiento Río Blanco (litología, alteración y mineralización), generado como producto de estos proyectos, se materializó en el año 2014.

Los resultados globales de este reconocimiento fueron reportados en las memorias anuales de la empresa. Los recursos minerales del yacimiento experimentaron un importante incremento en el período (Figura 1), lo que se traduce en 35 x 10⁶ toneladas de cobre fino, de los cuales un 44% corresponde a recursos demostrados, los que en tonelaje fueron incrementados casi al doble. Los recursos totales aumentaron en 5 x 10⁶ toneladas y en 0,03% Cu. Dentro de estos volúmenes se incluyen los cuerpos La Americana y Cerro Negro, descubiertos por la filial EMSA de Codelco en 2009 y 2011, respectivamente, en base al mejor conocimiento generado por la División Andina. De esta manera, **el yacimiento Río Blanco se posiciona como el de mayor tamaño reconocido en la Corporación.**

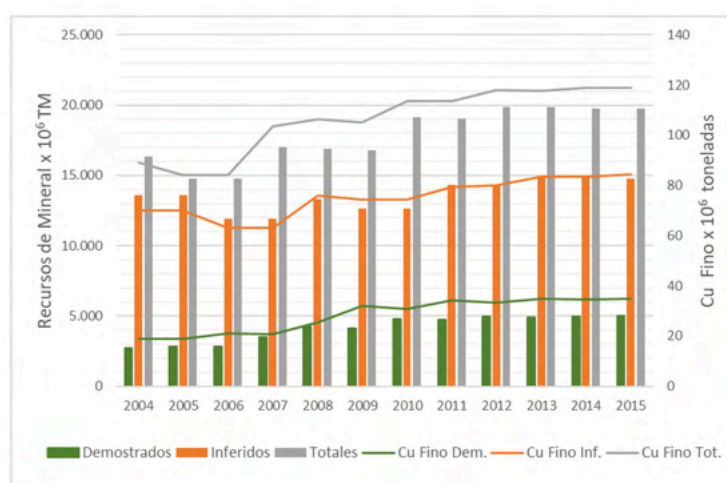


Figura 1. Recursos Geológicos División Andina 2004 – 2015

AGRADECIMIENTOS

A los Sres. Daniel Trivelli O. (Q.E.P.D.), Gerente General, Jorge Sougarret L., Gerente de Recursos Mineros y Desarrollo y Luis Serrano S., Superintendente de Geología, quienes impulsaron el desarrollo de los proyectos, a los Sres. Michel Galeb N., Superintendente de Geología y Geotecnia, y Ricardo Vargas R., Celso Aguilar. y Guillermo Ferraz, geólogos de la Superintendencia de Geología, por su constante participación y aporte en la ejecución de los proyectos, todos ellos de División Andina, Codelco Chile a la fecha de realización de los trabajos.

Palabras Clave: Yacimiento Río Blanco, Buenas Prácticas, Caracterización Geocientífica, Recursos Geológicos.

Referencias:

- Codelco Chile, (2004 – 2015). Memoria Anual.
- Cuadra, P., (2011). El impacto del conocimiento geológico en el negocio minero. El caso de División Andina. Geomin 2011 Plenary Session.
- Hermosilla, J., Cuadra, P. y Rojas, G., (2011). Relevant tools for generating geologic models at División Andina, Geomin 2011.
- Hermosilla, J., (2015). Caracterización geológica y cronología de los eventos de intrusión / brechización y alteración / mineralización del yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis de Magister Universidad Católica del Norte.

Caracterización de Sistemas Vetillas en Pórfidos de Cu-Mo: Una Revisión Práctica

Juan Hermosilla Bravo¹, Francisco Vera Macuada¹, Marco Solé Milla², Diego Salas Palma³

(1) Exploraciones Mineras Andinas S.A., Avenida Nueva Poniente, Villa Exótica, Calama, Chile

(2) Codelco Chile, División Andina, Superintendencia de Geología, Avenida Santa Teresa 513, Los Andes, Chile

(3) Anglo American Sur, Los Bronces, Gerencia de Geología, Isidora Goyenechea 2800, Edificio Titanium, piso 46, Las Condes, Santiago, Chile

OBJETIVO

La secuencia de vetillas en un sistema de pórfido de Cu-Mo es uno de los elementos geocientíficos clave para identificar la zonación de alteración hidrotermal y con ello la distribución de sulfuros (Gustafson y Hunt, 1975; Hermosilla, 2015). Esta contribución recopila el análisis de miles de secciones de testigos con los cuales se han desarrollado la paragénesis de sistemas de vetillas en los Yacimiento Gaby, Río Blanco-Los Bronces, El Salvador y en los proyectos La Huifa en el Distrito El Teniente, Lucy y Zeus en División Gabriela Mistral y Puntillas-Galenosa, todos ellos producto del reconocimiento geológico asociados a los programas de exploración orientados a ampliar la base minera de CODELCO.

INTRODUCCIÓN

Las fracturas y vetillas, así como las brechas, son una consecuencia inevitable del proceso evolutivo magmático-hidrotermal de los sistemas de Pórfidos de Cobre-Molibdeno, debido a la generación de grandes cantidades de fluidos acuosos acumulados en las cúpulas o partes apicales de las cámaras magmáticas, para producir una mezcla de magma y fluido de más de baja densidad y alta flotabilidad (Dilles, 1987). Una vez que se inicia una fractura, ya sea por inyección de magma o tectonismo, el vapor asciende y se expande, proporcionando energía mecánica que generará fracturas y brechas características de los depósitos de pórfido de cobre (Burnham y Ohmoto, 1980; Fournier, 1999). Este mecanismo de hidrofracturamiento ocurre siempre que P fluido sea mayor que P hidrostática + resistencia a la tensión de la roca (Tosdal y Richards, 2001). Bajo estas condiciones el magma asciende hacia el caparazón fracturado, pierde volátiles y los descensos de presión permite formar múltiples intrusiones de textura porfídica y junto con ello la exsolución de fluidos gatilla una secuencia típica de vetillas estrechamente asociadas con la evolución de los fluidos hidrotermales y con ello el desarrollo de los procesos de alteración y mineralización característicos en un sistema porfídico (Gustafson y Hunt, 1975). De esta forma existe un amplio consenso en el mundo geocientífico del aporte que genera un reconocimiento detallado de los sistemas de vetillas en las etapas de exploración generativa para la formulación y vectorización de target (Einaudi, 1997), como en el mapeo sistemático de estas para la caracterización, modelamiento y control de la mineralización.

Las bases de la clasificación de los sistemas de vetillas (Gustafson & Hunt, 1975) han sido definidos de acuerdo con tres aspectos: la mineralogía de relleno y halo, su relación temporal relativa y algunos aspectos morfológicos. No obstante, la observación y mapeo de detalle de vetillas en muchos pórfidos representa un desafío para muchos geólogos dedicados a la caracterización de estos sistemas hidrotermales. La alta variabilidad observada en sistemas individuales refiere, por un lado, a las diferentes unidades de roca que hospedan las vetillas, la evolución y relación de agua/roca en el fluido, y por otro y tal vez el más importante efecto, que enmascara las características primarias, proviene de la sobreimposición o reutilización de vetillas previamente formados que pueden complejizar el reconocimiento de los elementos clave o potencialmente pueden “borrar” las características de la vetilla original.

Vetillas tempranas EB/EDM

Comprenden al grupo de vetillas más temprano al que corrientemente se asocia la alteración potásica biotítica. Estas estructuras poseen biotita como mineral índice, proporciones subordinadas de mica blanca “sericita verde” y feldespato potásico son muy corrientes en el grupo EDM, las cuales además poseen un relleno de cuarzo a diferencia del grupo EB que no posee este relleno. La envergadura de las vetillas EB comúnmente van desde fracciones de milímetros a máximo 1 cm de espesor, mientras que típicamente las EDM poseen espesores mayores a los 5 mm y alcanzan varios centímetros considerando rellenos y halos. Es corriente que este grupo posea bordes sinuosos en rocas ígneas de grano medio con presencia de minerales ferromagnesianos, debido a que el proceso de biotitización se acentúa en los sitios de dichos minerales. Además, este grupo aporta pequeños granos de sulfuros en su línea central (EB) y/o diseminación fina en los halos (EDM), corrientemente con aportes de calcopirita y pirita (EB) y de calcopirita y bornita en el tipo EDM.

Se ha observado que el grupo EDM presenta una alta variabilidad de los componentes mineralógicos, posiblemente relacionado a la composición de la roca, es decir la disponibilidad de hierro de minerales ferromagnesianos, de manera que en rocas de composición cuarzo-feldespáticas (arcosa-aplita) éstas serán ricas en mica “sericita verde” mientras que en aquellas ricas en minerales máficos tendrán predominantemente biotita. Esta alta variabilidad también se ha observado relativa a la posición de la biotita en estas, exhibiendo en una misma litología vetillas EDM con biotita-cuarzo en relleno y feldespato-cuarzo-sericita en halos y otras con la relación inversa con feldespato-cuarzo en relleno y halos de biotita-sericita verde.

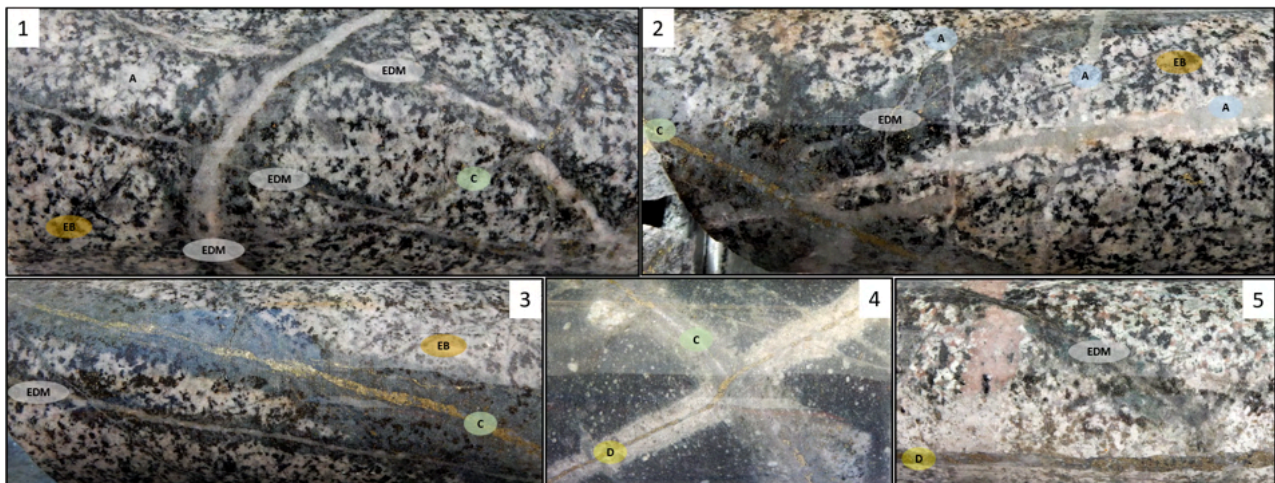
Respecto a la temporalidad, este grupo es sistemáticamente cortado por las vetillas de cuarzo tipo A y B, las cuales por su distribución y constituyente esencial cuarzo, el cual es extremadamente resistente a alteraciones posteriores, nos permiten disponer de una línea de tiempo muy útil para el reconocimiento de este grupo de vetillas tempranas en zonas de sobreimposición de alteración o en ambiente supérgeno, donde las características primarias pueden estar altamente modificadas.

Vetillas de Cuarzo A / B

Comprende al grupo de vetillas más corrientemente identificado en la mayoría de los sistemas de pórfidos, comúnmente asociados a la alteración potásica.

De forma habitual estas vetillas poseen espesores milimétricos de paredes rectas, aunque se ha descrito y observado para las vetillas tipo A una condición de paredes sinuosas no obstante ello depende fuertemente de la edad y reología de la roca hospedante, es decir si las vetillas A se emplazan en intrusiones cogenéticas es decir pórfidos en proceso de enfriamiento, ellas podrán exhibir paredes sinuosas, mientras que si estas estructuras se desarrollan en una rocas antigua y con comportamiento frágil, las fracturas que se generarán serán más bien rectas. Otra mención para los stockworks de vetillas de cuarzo A es que posean halos de feldespatos potásico, no obstante, esta característica va a depender en muchas ocasiones de la composición de la roca hospedante y en otras del espesor de la vetilla, pues en muchas ocasiones este halo se produce a escala microscópica, donde se observa a cristales de plagioclasas alteradas a feldespatos potásico en los bordes inmediatos de los cristales de cuarzo de las vetillas A. Mientras que las vetillas tipo B típicamente poseen ausencia de halos y es característico la presencia de cristales de cuarzo prismático creciendo desde las paredes hacia el centro dejando así una sutil línea intercristalina que muchas veces es ocupada por sulfuros de etapas posteriores en forma de una "sutura". En general al igual que EB y EDM este grupo de vetillas aportan spot de sulfuros en sus rellenos y/o sutura central de forma que su aporte será variable de acuerdo con el volumen de vetillas, y además de si es el evento de vetillas de cuarzo el que aporta la mineralización. Respecto a este punto lo que se ha observado en sistemas complejos multieventos como en el caso del Pórfido Río Blanco, es que las zonas de rocas de caja afectada por stockworks de sobreimpuestos EDM-A-C otorgan las zonas de mayor concentración de mineralización, por el contrario, en el Pórfido Gaby el evento de vetillas de cuarzo es volumétricamente bajo (<3-5%) y estas además poseen escasa calcopirita, por tanto sumados con las vetillas EB y la biotitización de los ferromagnesianos conforman alteración potásica de fondo cuya mineralización es considerada de background.

Muchos autores identifican en mapeo a este par de estructuras como un grupo denominado "Quartz Vein" debido a que por un lado el mineral constituyente predominante cuarzo es extremadamente resistente tanto a procesos de alteración subsecuentes siendo fácilmente identificables ya sea en ambiente hipógeno o supérgeno, y con ello posibilita identificar los núcleos de los sistemas de pórfidos, muy útil en el ámbito de vectorización de la exploración, como en el control de la alteración/mineralización temprana.



1) Set de vetillas tempranas tipo EDM (EBT = El Salvador). 2) Vetillas tempranas EB y EDM cortadas por set de vetillas de cuarzo tipo A y todas las anteriores cortadas por una vetilla de relleno sulfuro calcopirita con halo de sericita gris tipo C. 3) Comparación de vetillas tempranas EDM-EB y tipo C con halo de sericita gris. 4) Relación de corte entre vetilla C de halo sericita gris cortada por vetilla tipo D con sericita blanca. 5) Vetilla EDM y dique aplítico cortados por una vetilla tipo D con relleno de pirita con halos de sericita blanca y local clorita en el frente de reacción con EDM.

Transicionales a tardías C / D / E

Este grupo a diferencia de los grupos anteriores exhibe de forma regular un relleno de sulfuros junto a cuarzo y en caso de las vetillas tipo E al cuarzo se le agregan altas proporciones de sulfatos y carbonatos. Extensos halos de "sericita" con contenidos de arcillas es característico de estas estructuras en los cuales se le suman importantes sulfuros diseminados. Es debido a esto que este grupo aporta la mayor proporción de sulfuros fundamentalmente calcopirita y pirita, componentes esenciales para producir la generación de acidez necesaria para el desarrollo de un perfil supérgeno. Los halos poseen variaciones tanto en los tipos de micas como también en las proporciones de arcillas, las cuales varían para cada evento de este grupo de estructuras. En el caso de las vetillas C la mica que se identifica macroscópicamente corresponde a "sericita gris" debido a su tonalidad en la coloración, a diferencia de las vetillas D cuya mica se describe como "sericita blanca" posiblemente por su combinación con una más alta proporción de arcillas, mineral predominante en los halos de las vetillas tipo E, en las que sumado a proporciones de carbonatos les otorgarán un aspecto terroso a los halos de las vetillas más tardías de este grupo.

Una de las características macroscópicas distintivas entre los tipos C y D se refleja en el grado de destrucción/preservación de la textura de la roca en los halos, de tal forma que en las vetillas C los halos provocan una destrucción total de la textura original, a diferencia de los halos de vetillas D en los cuales existe un grado de preservación de la textura a pesar de la intensidad de la alteración cuarzo sericitica. En algunas ocasiones en los halos de las vetillas D se pueden observar una zonación mineralógica donde el desarrollo de "sericita" es predominante en la porción más próxima al relleno, mientras que hacia la roca de caja se agregan al halo clorita y/o carbonatos.

El sulfuro predominante de las vetillas tipo C es la calcopirita, debido a ello es que este evento comúnmente aporta mineralización en la etapa transicional de los pórfidos, mientras que las vetillas D y E el componente predominante es pirita. En las vetillas tipo E es distintivo su carácter polimetálico, debido a la frecuente incorporación en el relleno de proporciones menores de calcopirita, blenda, galena y algunas sulfosales como tenantita.

Este grupo de forma sistemática corta a los grupos de vetillas tempranas de biotita y/o cuarzo y es frecuente que esta sobreimposición reutilice los canales de permeabilidad preexistentes, de manera que vetillas que posean relleno como los tipos EDM o A y B serán comúnmente sujetos de reapertura y por tanto sometidos a un desequilibrio de la mineralogía de la vetilla original, no tan solo de los minerales de ganga, sino que también de los sulfuros. La sobreimposición de eventos es también frecuente dentro del grupo transicional-tardío donde podemos observar vetillas de relleno de cuarzo-pirita con un halo a veces perfectamente simétrico de "sericita gris" en cuyo halo la textura de la roca ha sido destruida, tal situación lleva a la errónea identificación de esta vetilla como del tipo C, mientras que el proceso ocurrido es la sobreimposición de una vetilla D sobre una vetilla preexistente C. En esta situación la formación de la vetilla C habría producido la destrucción textural en el halo por la modificación de los minerales originales a "sericita gris" y junto a lo anterior la precipitación de calcopirita tanto en relleno como en el halo, estos sulfuros son desestabilizados por el fluido tardío tipo D, reemplazando la calcopirita por pirita. Además, debido a que en el halo desarrollado por la vetilla C ya se habían transformado los minerales a micas, el fluido tardío no producirá cambios significativos macroscópicamente, no obstante, en la porción más lejana del relleno se pueden observar cristales de calcopirita remanentes del halo original de la vetilla C, mientras que en la porción proximal al relleno se observa solo diseminación de pirita propio del evento transgresivo D.

El proceso de desestabilización de sulfuros es conocido como lixiviación hipógena y la reprecipitación de estos ha sido denominado como enriquecimiento hipógeno, reconocido en Butte Montana (Brimhall, 1979), Caspiche (Sillitoe, 2010), en los yacimientos y El Teniente y Ministro Hales (Proffett, 2008) y estudios recientes en el pórfido Miduk en Irán (Yousefi y otros, 2022).

Influencia en los sistemas de vetillas por la composición de la roca de caja

En términos generales, en las estructuras por las que se propagan fluidos hidrotermales se produce una interacción fisicoquímica entre la composición de las rocas y la composición de los fluidos subsecuentes, la cual producirán las distintas asociaciones minerales propias de un evento de vetillas, tanto en el halo de alteración como en los minerales de relleno. Cuando estudiamos esta fenomenología llevada a solo a dos dimensiones, dado que se entiende que el fluido en una estructura particular es el mismo al atravesar un contacto litológico, observamos cambios significativos en la mineralogía tipo de un set de vetillas, ya sea en la composición en el halo, el relleno y/o los sulfuros asociados.

Cambios litológicos de alto contraste, frecuentemente ocurren en los sistemas de pórfidos entre intrusivos félsicos equigranulares o porfídicos de composición intermedia granodioríticos los cuales serán considerados como rocas tipo en la cual de forma corriente se desarrolla la mineralogía habitual de las vetillas. Se analizarán distintas situaciones de vetillas atravesando contactos entre estas rocas con: a) Rocas de caja melanocráticas comúnmente de composición andesítica a andesítica basálticas, o bien diques preminerales de composición cuarzodioríticos. B) Rocas de composición cuarzo-feldespáticas (aplitas) comunes en el desarrollo de suites magmáticas preminerales o interminerales o bien rocas de caja composicionalmente equivalentes (arcosas) donde estas dos últimas comparten la prácticamente ausencia de minerales ferromagnesianos.

Vetillas EB-EDM: Una primera manifestación observable en contactos de vetillas EB atravesando contactos entre rocas intrusivas granodioríticas y rocas melanocráticas (pórfidos dioríticos-andesitas) es la progresión del desarrollo del halo de biotita, cuya extensión estará relacionado a la presencia de minerales ferromagnesianos de la roca hospedante para su formación. Una observación extrema de la situación descrita anteriormente es la que se ha observado en vetillas con características asignables a EDM ricas en biotita en el halo, las cuales en la interfase contra rocas de composición cuarzo-feldespáticas "aplitas", forman micas blancas "sericita verde" sin biotita. Esta situación será extensiva a rocas de muy bajo contenido en ferromagnesianos como aquellas de composición tipo arcosas, cuarcitas y/o rocas ácidas felsíticas. En particular esta situación ha sido observada en pórfidos dacíticos leucocráticos donde se ha observado vetillas de cuarzo con halos de mica gris verde (vetillas de sericita verde) las cuales poseen altos contenidos de mineralización y son consistentemente cortadas por vetillas de cuarzo temprano (vetillas A / B), reflejando con ello su carácter pre-cuarzo característica fundamental de este grupo de vetillas tempranas pero sin presencia de biotita como mineral índice.

Vetillas A / B: Las vetillas de este grupo parecen ser las mas estables estructuras al atravesar contactos litológicos, indicando con ello que posiblemente la composición del relleno no está relacionada a la interacción con las rocas de caja, es decir la composición de estas vetillas estaría fuertemente influenciada por la composición del fluido.

Vetillas C / D: Las vetillas de este grupo son también extremadamente estables en condiciones de diferentes composiciones mineralógicas, pues en los ambientes de rocas ígneas de composición intermedia, o incluso en rocas leucocráticas ácidas sin ferromagnesianos, siempre que existan feldespatos a los cuales transformar en micas tendrán un comportamiento muy estable en ambientes litológicos variables.

Finalmente, el efecto sobre la precipitación de mineralización metálica relacionada a cambios en la interfase de vetillas viene dado principalmente por el proceso de lixiviación hipógena / enriquecimiento hipógeno, el cual se materializa en estructuras / alteraciones formadas en eventos tempranos debido a la transgresión de vetillas con fluidos capaces de la re movilización de cobre llevándolo a solución o re precipitándolo en eventos tardíos. Esto posibilita por ejemplo, que vetillas tardías tipo D posean calcopirita cuando son transgresivas en rocas fuertemente mineralizadas en zonas de alteración potásica intensa (Dilles y otros, 2022). A escala menor se ha podido observar que vetillas C cuyo relleno rico en calcopirita se ha observado que al atravesar vetillas de cuarzo no se produce

precipitación de calcopirita sino que de molibdenita, situación similar se produce en vetillas EDM con biotita en halos con calcopirita y/o bornita presentes en tobas de composición andesítica biotitizadas, las cuales al cortar paquetes de rocas sedimentarias tipo arcosa, preferentemente catalizan la nucleación de molibdenita en este tipo de vetillas, ahora con halos de sericita y feldespato blanco. Esta situación posiblemente refleje las necesidades de Fe disponible desde la roca de caja para la precipitación de sulfuros de Cu-Fe.

Palabras Clave: Pórfidos de Cu-Mo, Sistemas de Vetillas.

Referencias:

- Burnham, C. W., Ohmoto, H., 1980. Late stage processes of felsic magmatism. Mining Geology Special Issue 8, p. 1-11.
- Brimhall, G.H., Jr., 1979. Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana: Vein formation by hypogene leaching and enrichment of potassium-silicate protore: Economic Geology, v. 74, p. 556-589.
- Dilles, J. H., 1987. Petrology of the Yerington Batholith, Nevada: evidence for evolution of porphyry copper ore fluids. Econ. Geol. 82, p. 1750-1789.
- Einaudi, M. T., 1997. Mapping altered & mineralized rocks. An introduction to the "Anaconda Method". Stanford University.
- Fournier, R.O., 1987. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems, in Decker, R.W., et al., eds., Volcanism in Hawaii: Papers to commemorate the 75th anniversary of the founding of the Hawaiian Volcano Observatory: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p. 1487-1506.
- Gustafson, L. B. & Hunt, J. P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador Chile. Econ. Geol. 70, p. 857-912.
- Hermosilla, J., 2015. Caracterización geológica y cronología de los eventos de intrusión / brechización y alteración / mineralización del yacimiento Rio Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis de Magister Universidad Católica del Norte.
- Proffett, J. M., 2008. Geologic Review of The MM Deposit. Chuquicamata District. Chile. Unpublished report for Codelco, 12 p.
- Sillitoe, R., 2010. Porphyry copper systems: Economic Geology, v. 105, p. 3-41.
- Tosdal, R. M., Richards, J. P., 2001. Magmatic and Structural Controls on the Development of Porphyry Cu±Mo±Au Deposits. Society of Economic Geology, Reviews, Vol. 14, p. 157-181.
- Yousefi Soorani L., Shafiei Bafti, B., Homam, S. M., Abbasloo, Z., Taghizadeh Zanooghi, H., 2022. Hypogene enrichment in Miduk porphyry copper ore deposit, Iran. Scientific Reports, Nature.

Sobreimposición de alteración hidrotermal en sistemas de pórfidos de Cu-Mo: Una aproximación a la lixiviación hipógena de sulfuros

Juan Hermosilla Bravo¹, Marco Solé Milla², Francisco Vera Macuada¹, Diego Salas Palma³

(1) Exploraciones Mineras Andinas, Avenida Nueva Poniente, Villa Exótica, Calama, Chile

(2) Codelco Chile, División Andina, Superintendencia de Geología, Santa Teresa 513, Los Andes, Chile

(3) Anglo American Sur, Los Bronces, Gerencia de Geología, Avenida Isidora Goyenechea 2800 Piso 46, Las Condes, Santiago, Chile

INTRODUCCIÓN

En diversos depósitos minerales de estilo pórfido de Cu-Mo se ha podido establecer un estrecho vínculo entre los procesos de alteración hidrotermal (AH) y la mineralización, por un lado, la asociación de AH permite delinear el tipo de asociación de sulfuro (AS) y por otro lado el grado de penetratividad y/o destrucción textural producto de dicha AH tiene muy buena correlación con el porcentaje de sulfuros. Estos elementos han sido ampliamente utilizados para establecer los factores que controlan la mineralización y definición de unidades geológicas y/o de estimación. No obstante, los procesos de sobreimposición de eventos de AH visible a partir de las relaciones de corte de sistemas de vetillas y el efecto resultante en las AS en sistemas de pórfidos multifásicos, pone de manifiesto la importancia del reciclaje de elementos durante el tiempo en el que se desarrollan los eventos magmáticos-hidrotermales y con ello dar una respuesta geológico-genética para las heterogeneidades identificadas en los modelos de distribución de sulfuros en sistemas de pórfidos complejos.

SOBREIMPOSICIÓN DE EVENTOS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La manera más corriente y rápida de observar el proceso de sobreimposición de alteración hidrotermal es mediante la observación a escala macroscópica de relaciones de corte de vetillas de diferentes eventos. La sobreimposición de alteración producida por redes de vetillas que cortan conjuntos de estructuras previas obliteran la mineralogía formada originalmente (mena-ganga). Cuando la sobreimposición de alteración hidrotermal es tan agresiva, o bien esta ocurre mediante la reapertura de estructuras preexistentes, provoca en el observador una mayor dificultad en la determinación de los eventos. La reutilización de vetillas es una consecuencia de que estructuras formadas con anterioridad, actúan como planos de debilidad reactivados por fluidos posteriores, de acuerdo con esto, es esperable que la sobreimposición de vetillas sea un fenómeno más habitual del que se percibe.

En aquellos casos en los cuales la sobreimposición de eventos produzca una extensa modificación de las características texturales, morfológicas y mineralógicas, de manera que la identificación del evento preexistente no sea posible o conduzca a error, desde el punto de vista práctico para efectos de registro en mapeo geológico, se recomienda capturar el último evento y/o aquel que produce el mayor aporte de sulfuros.

Cuando la sobreimposición de eventos se produce por la reapertura de estructuras previas, el criterio más comúnmente utilizado para identificar este proceso es la determinación de asimetría entre el relleno de la vetilla más joven, respecto de la posición del halo de la estructura preexistente, o bien en el caso que esta reutilización sea en una vetilla que no tiene halo, es que alguno de los elementos de la estructura transgresiva manifieste una posición asimétrica o corten longitudinalmente a la pared. Comúnmente este proceso produce una modificación de las asociaciones mineralógicas características de la vetilla al quedar la mineralogía original expuesta a la reacción con las nuevas condiciones del fluido.

Otro elemento que permite identificar sobreimposición, en este caso de la mineralización, también se puede observar a escala de vetillas y comprende la modificación de la mineralización característica de la vetilla original, ya sea esta en relleno o en el halo, producto de la lixiviación hipógena de sulfuros. Tal vez este sea el más complejo de determinar en aquellos casos de alta intensidad de sobreimposición y/o en la reutilización de estructuras preexistentes, debido fundamentalmente a que es muy improbable poder determinar con confiabilidad relaciones texturales en granos de sulfuros en este tipo de yacimientos y además a los complejos procesos de este tipo de reacción en ambiente hipógeno.

Las más frecuentes reutilizaciones de vetillas son aquellas que posean rellenos y/o sutura central y/o relleno de sulfuros, por lo que los más comúnmente observados son vetillas tipo "B" con sutura de cuarzo reutilizadas por todos los eventos posteriores "C-D-E", en desmedro de vetillas tipo "A" debido a la constitución del cuarzo en el relleno. Vetillas tipo "EDM" que poseen corrientemente un relleno de cuarzo y halos de biotita pueden exhibir reutilización por evento de vetillas de tipos "C-D" y a su vez y de una manera menos evidente se han podido registrar reutilización de vetillas tipo "C" por vetillas "D".

Relaciones de corte y reutilización de vetillas EB - EDM

La sobreimposición de eventos de alteración tempranos EB y/o EDM es una de las más corrientes relaciones en sistemas de pórfidos, debido simplemente a que este es el primer evento de vetillas formado y por lo tanto es al cual todo el resto de los eventos posteriores estarán cortando y/o reutilizando.

En general los procesos de corte de este grupo de estructuras por vetillas de cuarzo (A-B) no generan modificaciones sustantivas de la mineralogía, puesto que los fluidos que dieron origen a los estrechos halos asociados a las vetillas A se encuentran aun en equilibrio con la mineralogía de mena y ganga formadas originalmente en el evento preexistente. Por otra parte, la reutilización de vetillas EDM por vetillas A o B es poco frecuente, y para poder observar este proceso la estructura nueva debe presentar algún grado de asimetría relativa al relleno y/o halo de la EDM. En este caso y en los siguientes se excluye la posibilidad de reutilización de vetillas tipo EB, debido a que de forma habitual no poseen un plano de debilidad por ausencia de relleno.

A diferencia de lo anterior, los procesos de sobreimposición en vetillas tempranas por vetillas transicionales a tardías, aquellos fluidos se encontrarán en claro desequilibrio con la mineralogía original de las vetillas EDM. En general se observa que la mineralogía original de biotita y/o feldespato potásico es reemplazada por clorita y/o "sericita" (mica gris=sobreimposición C; mica blanca=sobreimposición D). Por su parte la reutilización simétrica de estructuras previas EDM producirá halos dobles en la estructura, en la parte proximal al relleno se hallará la mineralogía predominante del evento tardío, mientras que el halo exterior se podrá identificar la mineralogía (mena-ganga) del evento original. Una de las particularidades de la sobreimposición del grupo de vetillas transicionales y tardías es la modificación de la asociación de sulfuros en los sectores de interacción, manifestándose que la asociación calcopirita-bornita característica del evento EDM se transformará a calcopirita en los halos transgresivos de vetillas C y D. Cuando la sobreimposición del evento de vetillas D es de mayor envergadura se modifica a calcopirita y pirita y cuando este alcanza una mayor intensidad ocurre la lixiviación completa del cobre en el sistema quedando vetillas EDM mineralógicamente modificadas con pirita predominante.

Evidencias de asimetría entre la posición del relleno y los halos en vetillas EDM reflejan por sí mismo un proceso de reutilización cuando este progresa y no se preserve la mineralogía del evento temprano.

Relaciones de corte y reutilización de vetillas de cuarzo (A-B)

Las relaciones de corte de este grupo de estructuras por vetillas transicionales a tardías, a diferencia del grupo anterior dado que cuarzo es su componente predominante, refractario a la alteración hidrotermal transicional a tardía, preservando la morfología y el cuarzo del evento original. Por su parte la reutilización de vetillas de cuarzo B es una de las más comunes, debido a que estas poseen sutura central de cuarzo corrientemente serán reutilizadas de forma simétrica generando una vetilla híbrida con sulfuros característicos de los eventos transgresivos, ya sea en la posición central del relleno de la vetilla (sutura), y un prominente halo de mica blanca (sericita gris=reutilización C; sericita blanca= reutilización D). No obstante, también se pueden reutilizar de forma asimétrica donde los sulfuros propios del evento tardío se desarrollen en sus bordes y posiblemente el halo rico en "sericita" sea simétrico a los sulfuros más que al relleno de cuarzo original. En algunas ocasiones el cuarzo puede actuar como una "barrera" en reutilización asimétrica inhibiendo el desarrollo de halo de micas en uno de sus flancos.

Relaciones de corte y reutilización de vetillas C

En la etapa hidrotermal principal y/o tardía se produce una coalescencia de estructuras cuya característica son los altos volúmenes de sulfuro tanto en relleno como diseminado en sus halos. Además, en ambos tipos de vetillas son generados halos compuestos de mica blanca (sericita gris= vetillas C; sericita blanca $\pm$ arcillas= vetillas D y E). Todo ello hace que la diferenciación macroscópica entre dichos eventos se base en sutiles elementos tales como la destrucción textural de la roca original producto de los halos de las vetillas C, en oposición a las vetillas D y E donde a pesar de la intensidad del reemplazo de la mineralogía original de la roca hospedante, su arreglo textural aún quedará preservado. No obstante, en los procesos de reutilización de este tipo de estructuras por vetillas tardías D, durante la formación de la vetilla tipo C ya obliteró la textura de la roca hospedante y además la tonalidad típicamente blanca del halo de mica de la vetilla tardía (sericita $\pm$ arcillas) la mayoría de las veces no exhibe la tonalidad característicamente blanco lechoso, haciendo prácticamente imposible el reconocimiento de este evento transgresivo cuando no existen evidencias de asimetría o de halos compuestos de micas con "sericita blanca" en la porción proximal al relleno y "sericita gris" aun preservada hacia la parte más distal de dicho relleno.

SOBREIMPOSICIÓN DE ASOCIACIONES DE SULFUROS

La sobreimposición de eventos de alteración hidrotermal, expresado en la sobreimposición/reutilización de stockworks de vetillas en un sistema de Pórfido de Cu-Mo, producen una modificación de la asociación de sulfuros original, y este efecto será de carácter local cuando las tasas de volumen de los eventos de vetillas sobreimpuestos sean bajas, pero puede llegar a modificar por completo la paragénesis de sulfuros a mayores volúmenes del evento transgresivo.

Evidencias de la sobreimposición de sulfuros en vetillas

Se han analizado muestras macroscópicas provenientes de sondajes diamantinos de campañas de exploración del yacimiento Rio Blanco-Los Bronces. Los elementos que se pudieron extraer del establecimiento de las relaciones de corte de vetillas como en muestras de reutilización de eventos, incluye cambios mineralógicos en los sulfuros contenidos en las vetillas originales, lo cual evidencia un proceso de lixiviación hipógena de los sulfuros originalmente en equilibrio por una nueva asociación mineral de acuerdo con las nuevas condiciones de formación del evento transgresivo.

La asociación de sulfuros de los eventos de alteración hidrotermal temprana consiste en la paragénesis calcopirita-bornita la cual se desequilibra en condiciones de sobreimposición por eventos transicionales-tardíos de forma tal que a bajas tasas de desarrollo de vetillas transgresivas se observa una clara disminución de bornita y aumento de la proporción relativa de Cpy, debido a que en ambos eventos de vetillas transgresivas al entrar en el contacto con relleno y halo de la vetilla EDM transformará bornita por calcopirita. Tal situación se representa de forma muy gráfica cuando en las intersecciones de vetillas D contra halos EDM, se observará vetillas de halos de mica blanca "sericita blanca" ricos en calcopirita. De esta forma la sobreimposición de bajos volúmenes de vetillas C/D sobre stockworks de vetillas EDM producirá el desequilibrio por desestabilización de la bornita para dar lugar a un incremento relativo de calcopirita. Al aumentar la intensidad (volumen) de vetillas C sobreimpuestas, la bornita desaparecerá de la asociación de sulfuros original quedando calcopirita con menor proporción de pirita. Por su parte a mayores tasas de sobreimposición de vetillas tipo D sobre EDM, junto con la desaparición de bornita, se iniciará una transformación de la calcopirita por pirita, lo cual a muy altos volúmenes de vetillas transgresivas D sobre stockworks de halos EDM se generará una transformación a una asociación de sulfuros residual de pirita > calcopirita.

De la misma forma que ocurre con las vetillas EDM, la sobreimposición de vetillas tardías D en zonas de stockworks de vetillas tipo C, desestabilizará la asociación de sulfuros típica de este evento con calcopirita dominante la cual se ve modificada a calcopirita>pirita al sobreponerse set de vetillas D, pero al aumentar la intensidad de sobreimposición la paragénesis final será rica en pirita con muy escasa proporción de calcopirita.

Relaciones empíricas resultantes de la sobreimposición en las asociaciones de sulfuros

Se ha podido establecer de forma empírica el efecto de los eventos de vetillas transgresivas más comúnmente observados, los volúmenes aproximados de sobreimposición y el efecto resultante en la asociación de sulfuros del evento original. Estos elementos fueron integrados en forma de un diagrama triangular en cuyos extremos se encuentran las asociaciones de sulfuros originales y en cada eje se observan las proporciones estimadas de sobreimposición de vetillas D y C respectivamente sobre el evento hidrotermal respectivo (Figura 1).

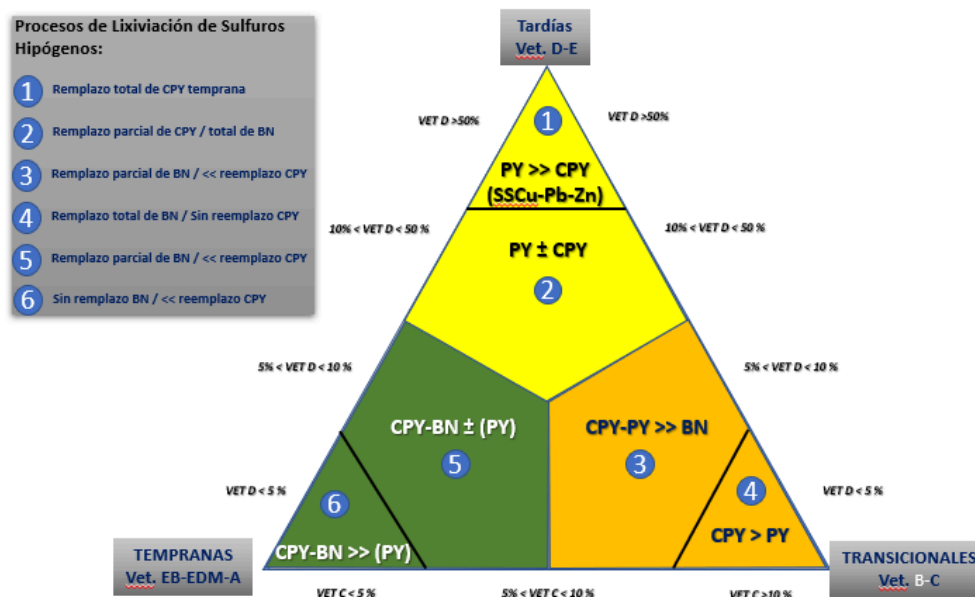


Figura 1: Diagrama ternario de sobreimposición de alteración hidrotermal relacionado a vetillas en sistemas de pórfidos de Cu-Mo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Lixiviación y Enriquecimiento Hipógeno: Evidencias en Sistemas de Pórfidos

La lixiviación hipógena de sulfuros y la sobreimposición de eventos ha sido relacionada como hipótesis para la generación enriquecimiento hipógeno en sistemas de pórfidos cupríferos, produciendo altas leyes de mineralización de sulfuros primarios en sistemas como en los casos de yacimientos conocidos como El Salvador, La Escondida, Chuquicamata, Collahuasi, Batuhiaju y Butte entre otros. El proceso de desestabilización de sulfuros es conocido como lixiviación hipógena y la reprecipitación de estos ha sido denominado como enriquecimiento hipógeno, reconocido en Butte Montana (Brimhall, 1979), Caspiche (Sillitoe, 2010), en los yacimientos y El Teniente y Ministro Hales (Proffett, 2008; 2011). En Butte Montana, G. Brimhall (1980) fue pionero en establecer el mecanismo de lixiviación hipógena de sulfuros a partir de un fluido tardío sobreimpuesto a la monzonita cuarcífera intensamente fracturada y con mineralización primaria de calcopirita "Pre Main Stage". A partir de una aproximación macroscópica y sustentada con un marco fisicoquímico teórico planteó que la calcopirita relacionada a alteración potásica temprana sería progresivamente lixiviada a medida que aumenta la intensidad de la sobreimposición de sericita. Este mismo autor propone que el proceso de lixiviación hipógena de cobre habría permitido la formación de un amplio sistema de vetas de alta ley "Main Stage" explotadas durante más de un siglo.

Por otra parte, estudios recientes liderados por L. Yousefi (2022) en el pórfido Miduk en Irán, han permitido documentar aspectos macroscópicos y relaciones microscópicas asociadas al Enriquecimiento Hipógeno en la zona de alta ley de dicho yacimiento. A partir de observaciones detalladas de la mineralogía de mena de 550 secciones pulidas, este trabajo pudo establecer con alta confianza de tres aspectos relevantes del Enriquecimiento Hipógeno:

- Existencia de eventos de reapertura de vetillas tempranas rellenas por sulfuros primarios enriquecidos en cobre.
- Texturas de reemplazo de la asociación calcopirita-pirita temprana por calcopirita-bornita-calcosina y finalmente covelina-digenita hipógenas.
- Mineralización tardía enriquecida en cobre relacionada con la presencia de micas blancas (sericita).

Implicancias de la necesidad de caracterización de Lixiviación Hipógena

Cuantificar los fenómenos de sobreimposición a partir de las observaciones de relaciones de corte y/o de reutilización de eventos de vetillas debe ser una actividad para tener presente en la caracterización en un depósito de tipo pórfido cuprífero, esto debido a los profundos cambios en la mineralogía de mena y ganga productos del desequilibrio entre los fluidos que dan forma al evento hidrotermal inicial y los fluidos relacionados a las alteraciones transgresivas subsecuentes. Comúnmente se producirán asociaciones de minerales de mayor complejidad cuyos rasgos como menas enriquecidas en pirita y/o su asociación a micas blancas tardías y la incorporación de otros metales pueden ser factores determinantes en la diagramación de los procesos de tratamiento metalúrgico.

Por otra parte, la existencia en este tipo de depósitos de amplias zonas donde se hallan rocas enriquecidas en pirita de muy baja ley en cobre asociadas a alteraciones tardías transgresivas, el reconocimiento en estas zonas de modificaciones en las asociaciones de sulfuros producto de lixiviación hipógena de la mena trae, desde el punto de vista de la exploración, la potencial necesidad de reconocimiento con el objetivo de reconocer a una mayor profundidad la paragénesis de sulfuros temprana del depósito, esto dado que las alteraciones transgresivas comúnmente decrecen en profundidad. Por otra parte, el cobre lixiviado y puesto nuevamente en solución puede incorporarse en eventos más tardíos los cuales potencialmente pueden re-precipitar enriqueciendo en metales zonas aledañas a las zonas lixiviadas y/o formando sistemas de estructuras preexistentes en forma de vetas y/o brechas de alta ley.

Palabras Clave: Sobreimposición, Alteración, Lixiviación/Enriquecimiento Hipógeno, Sistemas de Vetillas.

Agradecimientos: Los autores agradecen la revisión del Sr. Juan Carlos Toro, Dir. de Exploraciones, al Sr. Marcelo Santibáñez Gerente Gral. de EMSA y al Sr. Guillermo Müller Gerente de Exploraciones de Codelco.

Referencias:

- Brimhall, G. H. Jr., 1979. Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana; vein formation by hypogene leaching and enrichment of potassium-silicate protore. *Econ. Geol.* 74, p. 556–589.
- Gustafson, L. B. & Hunt, J. P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador Chile. *Econ. Geol.* 70, p. 857–912.
- Hermosilla, J., 2015. Caracterización geológica y cronología de los eventos de intrusión / brechización y alteración / mineralización del yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis de Magíster Universidad Católica del Norte.
- Proffett, J. M., 2008. Geologic Review of The MM Deposit. Chuquicamata District. Chile. Unpublished report for Codelco, 12 p.
- Proffett, J. M., 2008. Review of Geology and Exploration in The El Teniente District, Central Chile. Unpublished report for Codelco, 49 p.
- Sillitoe, R., 2010. Porphyry copper systems: *Economic Geology*, v. 105, p. 3–41.
- Yousefi Soorani L., Shafiei Bafti, B., Homam, S. M., Abbasloo, Z., Taghizadeh Zanooghi, H., 2022. Hypogene enrichment in Miduk porphyry copper ore deposit, Iran. *Scientific Reports, Nature*.

Caracterización mineralógica de material arcilla con capacidad de generar bombeo agua-barro en sectores productivos y su impacto metalúrgico en División Andina

Francisca López¹, Silvana Herrera², Francisco Marín², Gisella Palma¹

(1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Ciencias, ingeniería y tecnología, Av. Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) División Andina-CODELCO, Área de Geología de Producción, Superintendencia de Geología

En minas subterráneas con métodos de explotación tipo *caving* existen grandes riesgos de generar bombeos de agua-barro, los cuales se definen como deslizamientos de material fino con gran contenido de agua dentro de puntos de extracción. Para que estos eventos ocurran deben presentarse tres factores claves desencadenantes: (1) agua, (2) perturbación del punto de extracción, y (3) presencia de material fino ($<2 \mu\text{m}$). Este último es de gran importancia, dada la posible ocurrencia de minerales de arcilla, los que por sus propiedades químicas y físicas pueden provocar cambios en las propiedades reológicas de las rocas, aportando una mayor fluidez al material de los puntos de extracción y, de la misma manera, causar adversidades en los procesos posteriores de flotación y recuperación metalúrgica.

El yacimiento Río Blanco de la División Andina de Codelco corresponde a un depósito de clase-mundial tipo pórfido Cu-Mo emplazado en la franja metalogénica del Mioceno medio – Plioceno. La conminución del material que se genera producto del método de explotación tipo *caving* empleado en esta División, así como la degradación natural de la mina con los años, han provocado el aumento del contenido de material fino ($<2 \mu\text{m}$) en los puntos de extracción. Por consiguiente, el año 2022 se realizó un estudio de caracterización mineralógica del material fino de la mina subterránea Río Blanco obtenido desde los puntos de extracción. El objetivo principal de este estudio fue identificar y caracterizar la ocurrencia de minerales en la fracción arcilla que pudiesen ser perjudiciales en el proceso metalúrgico y operación minera, mediante la definición de zonas mineralógicas.

Dado a los antecedentes previamente mencionados, es que el año 2023 se planteó la realización de este estudio, específicamente en el sector suroeste de la mina subterránea, el cual se encuentra en producción. El objetivo principal de este estudio es la caracterización del material fino en los actuales puntos de extracción y el reconocimiento de las fases minerales que podrían generar problemas a la operación minera y al proceso metalúrgico.

Por una parte, los análisis del material fino mediante difracción de rayos-X (DRX) indican la ocurrencia de una fracción de minerales de arcilla correspondiente a arcillas expansivas (grupo de las Esmeclitas). Es importante mencionar, que estas se encuentran presentes en los sectores de producción influyendo en el comportamiento de los puntos de extracción, i.e., sector con humedad, lo que implica un alto riesgo de generación de bombeos agua-barro. La presencia de arcillas expansivas podría generar barros más fluidos por su capacidad de adherir agua en su estructura cristalina.

Por otra parte, los resultados metalúrgicos de las pruebas de flotación *Rougher* de material fino indican la existencia de zonas en el sector suroeste de la mina subterránea con altas leyes de Cu, pero con bajos valores de recuperación del mineral. Estos resultados metalúrgicos podrían asociarse a la presencia de minerales arcillas que podrían llegar a provocar cambios en las condiciones de flotación tales como modificaciones en la reología de la pulpa y comportamiento de la espuma, así como también cambios en el pH natural y en la proporción de los reactivos utilizados, además de dificultar el posterior proceso de recuperación metalúrgica.

Basándose en los resultados mineralógicos y metalúrgicos obtenidos en este estudio, se concluye que se debiesen realizar estudios periódicos de caracterización mineralógica del material fino para controlar y supervisar el estado de los puntos de extracción, con el fin de evitar efectos adversos en los procesos metalúrgicos y las operaciones mineras de la División.

Palabras Clave: arcillas, punto de extracción, flotación, recuperación.

Financiamiento: Superintendencia de Geología, División Andina-CODELCO, Chile.

Referencias:

- Herrera & Marín (2022). Geological characterization and metallurgical impact of fine particle material from the underground mine at Andina Division.

Comparación de modelos de estimación de recursos en depósitos de caliche

Andrés Rivera Riveros¹⁻², Daniel Baeza²⁻³, Elías Obreque³, Nicole Reyes², Marcelo Surjan², Francisco Anguita², Rodrigo Zárate², Brian Townley¹⁻²⁻⁴⁻⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Gea SpA., Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Santiago, Chile

(5) Geo Analytical Vision S.A, Santiago, Chile

La estimación de recursos en un depósito de caliche, una fuente clave de yodo y nitratos en Chile, presenta desafíos significativos. Chile es reconocido como un importante productor mundial de yodo, y los yacimientos de caliche en el norte del país albergan dos tercios de las reservas de yodo del planeta. Sin embargo, estimar con precisión los recursos en yacimientos de nitratos es un problema complejo debido a la alta variabilidad espacial de los datos de muestreo y la necesidad de una mayor exactitud en las estimaciones.

Para abordar esta problemática, se propone utilizar técnicas geoestadísticas para modelar la variabilidad del yacimiento y realizar la estimación de recursos. Se emplea un modelo variográfico omnihorizontal para representar la estructura espacial del depósito y se aplica el Kriging Ordinario, una técnica de estimación geoestadística. Al utilizar un Elipsoide de búsqueda con una distancia horizontal amplia y un rango vertical reducido, se obtienen estimaciones más precisas de los recursos en el yacimiento. Comparativamente, el Kriging ofrece resultados superiores en relación a otras técnicas, como el Inverse Distance Weighting (IDW). Además, se destaca la importancia de aumentar la cantidad de información disponible en zonas pobremente muestreadas y desarrollar modelos de bloques más detallados para lograr estimaciones más precisas y obtener una representación más completa de las concentraciones elementales dentro del yacimiento.

En conclusión, la estimación de recursos en un yacimiento de caliche plantea desafíos que pueden abordarse mediante el uso de técnicas geoestadísticas. El modelado de la variabilidad espacial y la aplicación de Kriging Ordinario permiten obtener estimaciones confiables y precisas de los recursos en los yacimientos de nitratos. La adopción de estas técnicas mejora la planificación y el desarrollo de proyectos mineros, especialmente en lo que respecta a la extracción de nitratos y yodo a partir del caliche. Se resalta la importancia de contar con información suficiente y modelos de bloques detallados para lograr estimaciones más precisas y una operación más efectiva en términos de caracterizar las concentraciones elementales. Estas soluciones contribuyen a una explotación más eficiente y sostenible de los recursos minerales en Chile, beneficiando tanto a la industria como al desarrollo humano en general.

Palabras Clave: Estimación de recursos, Caliche, Nitratos, Yodo.

Referencias:

- 1. Emery, X. (2022). Apunte de Geoestadística. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- 2. Beluzán, A. (2017). Estimación de recursos y reservas en un proyecto de yodo. Recuperado de <https://mail.comisionminera.com/documentacion/category/104-mejores-practicas-en-exploracion-y-estimacion-de-recursos-y-reservas-20-abr?download=965:9-estimacion-recursos-y-reservas-deposito-yodo-a-beluzan-abelco-consulting>.
- 3. Pérez Fodich, A. (2013). Origen del yodo y cromo en los nitratos del desierto de Atacama, Chile (Tesis de maestría). Universidad de Chile.
- 3. Riquelme Palavecino, M. M. (2019). Distribución y caracterización mineralógica de los caliches del yacimiento de nitratos Chiquiquiray, Región de Tarapacá, Chile (Memoria de pregrado). Universidad Andrés Bello, Sede Concepción, Facultad de Ingeniería, Geología.
- 4. Chilès, J.P. & Delfiner, P. (1999) Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Wiley, New York.
- 5. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines.

Caracterización de Sistemas de Vetillas en Ambiente Supérgeno del Pórfido Gaby

Sebastián Salamanca Moya², Juan Hermosilla Bravo¹, Claudio Nicolás Vargas³, Francisco Vera Macuada¹, Alejandra Araneda Magallanes¹, Pedro Carrasco Moraga¹, Mauricio Navarrete Ragga¹, José Barrera Pérez¹

(1) Exploraciones Mineras Andinas S. A., Dirección de Exploración, Avenida Nueva Poniente, Villa Exótica, Calama, Chile

(2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, MANUEL MONTT 367, PROVIDENCIA, SANTIAGO, Chile

(3) Codelco Chile, División Gabriela Mistral, Superintendencia de Geología, Av.. Nueva Oriente 2696 Villa Exótica, Calama, Chile

INTRODUCCIÓN

Una consecuencia inevitable en el proceso de evolución de los sistemas de Pórfidos de Cobre-Molibdeno Andinos es encontrarse con rocas con características mineralógicas y texturales que difieren de los rasgos en ambiente hipógeno. Esto es producto de los profundos cambios que ocurren en las áreas de este tipo de depósitos que han sido sometidas a procesos supérgenos (Sillitoe, 2010). En esta zona se exponen rocas cuyas características originales se han visto modificadas, en particular en la mineralogía primaria de la roca y especialmente aquella de las vetillas formadas previamente por procesos magmáticos-hidrotermales en condiciones muy diferentes a aquellas que posteriormente circulan por la permeabilidad de las rocas en ambiente supérgeno. Los cambios en su mayoría son del tipo mineralógico, pero en algunas ocasiones también pueden ser texturales, de ahí que en este tipo de ambiente fenómenos como la reutilización de estructuras es particularmente complejo de identificar. Afortunadamente la comprensión detallada de las características macroscópicas específicas en cada uno de los tipos de vetillas en ambiente hipógeno (Hermosilla, 2015, 2023), permite, en el ambiente supérgeno, asociar algunos rasgos distintivos observables a dichas estructuras permitiendo su identificación por grupos.

METODOLOGÍA

Mapeo de detalle: El proceso de mapeo de detalle incluye el registro continuo de variables geológicas de acuerdo con lo establecido en el protocolo utilizado por División Gabriela Mistral (Plaza, 2020), mientras que las metodologías para establecer la temporalidad y control de mineralización se realizó bajo los estándares definidos por EMSA (Hermosilla y Pardo, 2020a, 2020b). Esta contribución compila el registro de 13.000 m de mapeo de sondeos relacionados a la campaña de exploración avanzada del proyecto Zeus.

Registro macroscópico: Junto con la actividad de mapeo de sondeo y para llevar a cabo el proceso de caracterización geológica detallada del proyecto, a la fecha se han extraído y caracterizado fotografías macroscópicas de testigos de sondeo (Total=423 imágenes) con relaciones texturales, contactos litológicos, estructuras y relaciones de corte del proyecto.

Análisis petro-calcográficos: Complementario a lo anterior se han enviado a análisis 76 muestras de testigos de sondeo para estudios petro-calcográficos (125 estudios, 69 análisis de CT y 56 análisis de CP) descritos por Catalina Martínez, geóloga mineralogista de la empresa Geomaq. Esta información ha sido tabulada para entregar las proporciones de abundancia de los minerales formadores de roca, los volúmenes estimados de minerales de alteración hidrotermal, caracterización de relleno y halo de vetillas y de la mineralización metálica.

CARACTERIZACIÓN DE VETILLAS EN AMBIENTE SUPÉRGENO

Vetillas tempranas EB/EDM

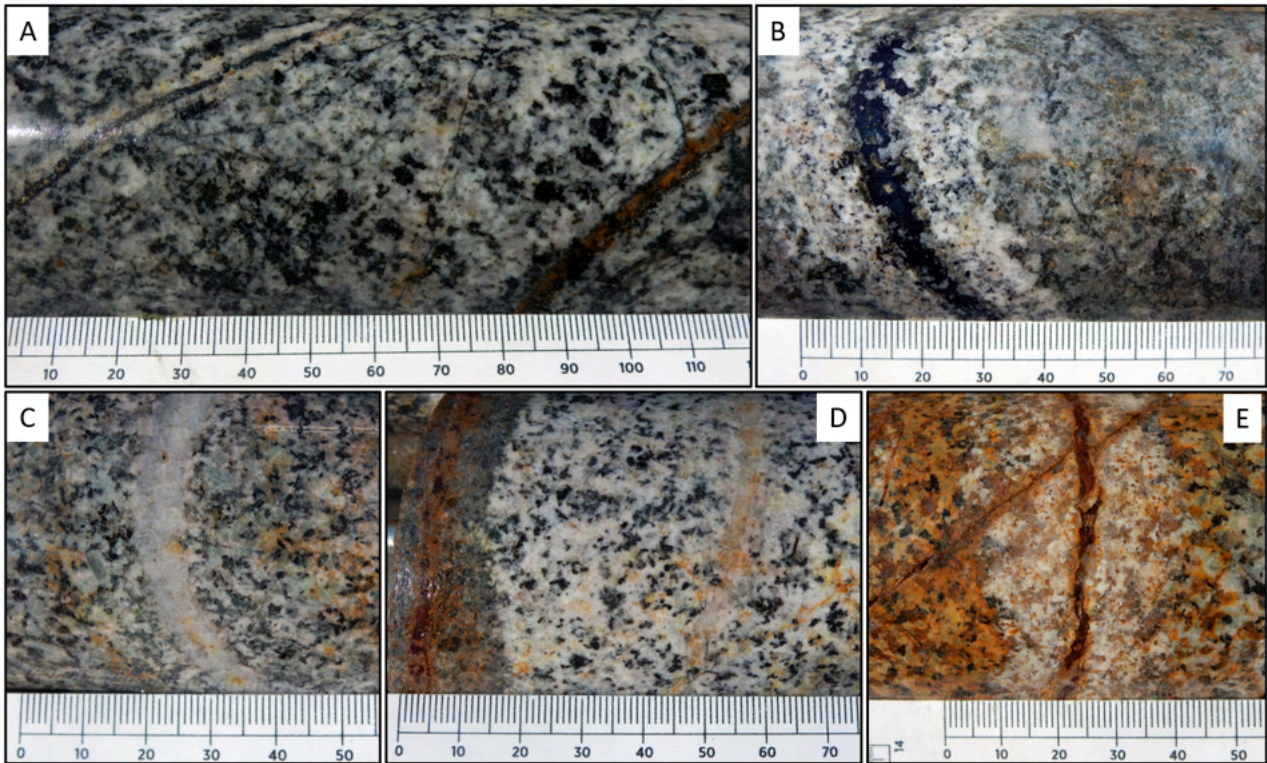
Las vetillas de tipo EB en ambiente supérgeno frecuentemente exhiben una mineralogía de limonitas por causa de la oxidación de la biotita presente en este tipo de vetillas en forma de goethita y/o ferrihidrita. En condiciones de menor flujo acuoso ácidos se pueden observar remanentes de biotita, muchas veces alterada y/o con un reemplazo pseudomorfo a clorita preservando en estas el hábito micáceo original de la biotita hidrotermal. El fracturamiento mediante guillotina permite la apertura de este tipo de estructuras pudiendo observar con facilidad la concentración de biotita en finas "pátinas" a veces como guías muy finas a las cuales se pueden asociar pequeñas proporciones de oxidados de cobre y/o cobre nativo - cuprita en la zona inferior del desarrollo del perfil supérgeno.

En caso de las vetillas EDM comúnmente se mantiene preservado en el relleno de cuarzo y al presentar mayor proporción de sulfuros de cobre que las vetillas EB, se observa en relleno limonitas indígenas característicamente en forma de "spots" que reflejan la presencia de sulfuros discontinuos en el relleno de cuarzo - biotita cloritizada y/o sericita verde de acuerdo con el tipo de EDM original. En particular en algunas vetillas de este tipo que originalmente poseen halo de feldespatos potásico, bajo ciertas condiciones este se mantiene estable o levemente alterado en comparación a la plagioclasa magmática original de la roca. Debido a sus componentes hidrotermales originales, estas estructuras actúan de forma frecuente como buffer de las soluciones con cobre supérgeno, permitiendo la precipitación de oxidados de cobre o el desarrollo de reemplazo de los sulfuros de cobre originales con desarrollo de calcosina y/o covelina en la zona de enriquecimiento secundario.

Vetillas de Cuarzo

Este grupo de estructuras (vetillas tipo A y B) por su composición rica en cuarzo las hace muy resistentes en todo tipo de ambiente, por lo que en la zona supérgena las encontramos preservadas. Una característica es que pueden presentar "spot" de limonitas tipo goethita en forma de boxworks procedentes de la lixiviación de los sulfuros que estas estructuras contenían. A pesar de que la gran mayoría de las veces estas estructuras se observan con ausencia de halos, no obstante, al realizar el proceso de corte con guillotina dichas estructuras son abiertas por el relleno donde se puede observar claramente la composición mineralógica primaria rica en feldespatos de las vetillas A versus la mineralogía de solamente de cuarzo propia de las vetillas de tipo B.

Otra particularidad en ambiente supérgeno es que potencialmente estas estructuras desarrollan un pseudo halo que comúnmente llama a confusión por otros grupos de vetillas, el cual se produce debido a la impregnación simétrica de limonitas exóticas emulando un halo propio de otros tipos de estructuras (EDM, C o D). El reemplazo de los sulfuros primarios distribuidos en forma de "spots" en las zonas de mineralización mixta y de enriquecimiento secundario dan lugar al desarrollo de calcosina o covelina y algunos óxidos de hierro como hematita y/o goetita. Junto a lo anterior, ocasionalmente en el relleno se pueden observar pequeñas proporciones de oxidados de cobre con crisocola predominante. Es común que estructuras de cuarzo tipo B sean reutilizadas por vetillas transicionales-tardías (C-D).



A) Vet. EDM-EB LIX en zona ESE contiene Cpy reemplazada por Cv, DDH-7161@249,35 m. **B)** Vet. EDM_Cpy-Cv, Zoom_DD7161@211,4_211,5 m. **C)** Vet. B Qtz, DDH-7159@86,8 m. **D)** Set Vet. A y C LIX, DDH-7159@77,4m. **E)** Vet. D LIX con boxworks goethita y halo sericita blanca argilizado, DDH-7181@122,2 m.

Vetillas Transicionales a Tardías C / D

Este tipo de estructuras se caracteriza por presentar en ambiente supérgeno una sutura continua de limonitas ya que proceden del reemplazo de los sulfuros primarios que comúnmente ocupan el relleno de este grupo de vetillas (calcopirita en vetillas tipo C y pirita dominante en vetillas tipo D), en el caso de las vetillas tipo C el halo de micas característico de "sericita gris" que suele desarrollar un alto grado de destrucción textural de la roca original al cual se le suma la existencia de un halo con presencia de boxworks de goethita y ocasionalmente tinción de limonitas. En el caso de las vetillas tipo D el halo de "sericita blanca" con la textura original de la roca preservada es un rasgo aún observable, y también al igual que las vetillas tipo C estas estructuras presentan grados variables de tinción de limonitas, La que ocasionalmente es más fuerte en el halo proximal del relleno, disminuye en la porción intermedia del mismo para nuevamente presentar una mayor concentración de limonitas exóticas en la porción distal del relleno.

Las vetillas tipo C al ser uno de los mayores aportes de sulfuros al sistema, en ambiente supérgeno por medio de lixiviación y de forma frecuente la posterior concentración en estas estructuras de oxidados de cobre ya sea en el relleno y/o diseminado en los halos de sericita, se puede observar crisocola y/o brochantita-antlerita, de manera que es común que estas estructuras concentren la mineralización de cobre en ambiente supérgeno. Aunque a nivel de depósito se pueden observar variaciones del tipo de mineralización, cuyos procesos se relacionan posiblemente a la migración de soluciones en función de las condiciones de acidez y de reactividad de la roca de caja, con presencia de atacamita-antlerita en zonas de menor movilidad a zonas de crisocola y óxidos negros en las soluciones más distales. De igual forma en la lixiviación de la zona enriquecimiento secundario se produce el reemplazo parcial/total de calcosina - covelina dando lugar a la formación de brochantita-antlerita y limonita hematita.

Por su parte las vetillas tipo D comúnmente no poseen óxidos de cobre, pero si abundantes proporciones de limonitas goethita y/o hematita dependiendo comúnmente del tipo de roca (goethita en rocas de composición intermedia y hematita en rocas de composición más ácida) Por su parte, en ambiente de enriquecimiento secundario no es frecuente encontrar altas proporciones de calcosina y/o covelina, salvo en aquellas vetillas reutilizadas EDM y/o C donde se observa enriquecimiento en los halos mientras que el relleno y halo interno se observa abundante pirita y escasos sulfuros secundarios.

Aunque a nivel de depósito se pueden observar variaciones del tipo de mineralización en las diferentes vetillas observadas, cuyos procesos se relacionan posiblemente a la migración de soluciones en función de las condiciones de acidez y de reactividad de la roca de caja, con presencia de atacamita-antlerita en zonas de menor movilidad a zonas de crisocola y óxidos negros en las soluciones más distales.

Procesos de Sobreimposición y Reutilización

El proceso de sobreimposición y reutilización de vetillas se produce en ambiente hipógeno, de esta manera los elementos y criterios utilizados se pueden extrapolar al ambiente supérgeno, teniendo en consideración que el resultado del proceso supérgeno sobre este fenómeno producirá modificaciones mineralógicas significativas. De esta forma se observará que en general existe una baja reutilización de vetillas tempranas de biotita tipo EB, pues estas estructuras no presentan relleno susceptible de reutilizar, no obstante lo anterior, si es frecuente que este tipo de estructuras se encuentren alteradas a clorita debido a alteración retrógrada o supérgena.

Por su parte, el grupo las vetillas EDM es el tipo más frecuentemente reutilizado de este grupo, este fenómeno se observa comúnmente por vetillas transicionales a tardías donde se puede observar asimetría en la posición del relleno de limonitas y/o halos mineralógicamente complejos donde en la posición más externa podemos ver preservada mineralogía rica en biotita o feldespato potásico-micas blancas (sericita verde) propias de las vetillas EDM. Ahora si la sobreimposición es por el relleno previo y por tanto simétrica respecto de los halos, y además si esta se desarrolla de forma extensiva enmascarando por completo la mineralogía original, es prácticamente imposible identificar el evento preexistente en ambiente supérgeno. Sin embargo, en ambiente de enriquecimiento secundario podemos observar en la reutilización de vetillas D o C por EDM donde en el relleno los sulfuros originales son reemplazados por pirita y el proceso de enriquecimiento se produce en la porción más externa del halo que contiene la calcopirita y/o bornita originalmente formados en este tipo de vetilla.

La reutilización incompleta de vetillas D por vetillas tipo C, al igual que en ambiente hipógeno, se puede observar la diferencia textural y/o de coloración de las micas blancas sobreimpuestas a la sericita gris del halo, sin embargo, el desarrollo de arcillas que tonos blanquecinos producto de soluciones supérgenas, pueden dar a lugar a sobreestimar el proceso de reutilización descrito. En el caso de sobreimposición simétrica y de carácter completo, es decir reemplazo total de la mineralogía original, inclusive con el reemplazo de los sulfuros en relleno y halo por pirita, aún podríamos identificar el remanente de las texturas de los boxworks de limonita para identificar el sulfuro original, el que sí es predominantemente pirita y con halo de micas “sericita” destructivo de la textura, esta característica es propia de las vetillas C y por tanto podemos identificar que el halo originalmente formado es de “sericita gris” al que se sobreimpuso la “sericita blanca” tardía del evento D.

Palabras Clave: Pórfidos de Cu-Mo, Sistemas de Vetillas, Ambiente Supérgeno.

Agradecimientos: Los autores agradecen la revisión del Sr. Juan Carlos Toro Dir. de Exploraciones, al Sr. Marcelo Santibáñez Gerente Gral. de EMSA y al Sr. Guillermo Müller Gerente de Exploraciones de Codelco.

Referencias:

- Hermosilla, J., 2015. Caracterización geológica y cronología de los eventos de intrusión / brechización y alteración / mineralización del yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis de Magister Universidad Católica del Norte.
- Hermosilla, J., Solé, M., Salas, D., 2023. Caracterización de Sistemas Vetillas en Pórfidos de Cu-Mo. XVI Congreso Geológico Chileno.
- Hermosilla, J., Pardo, R., 2020 (a). Procedimiento Guía para la Determinación de Temporalidad y Cronología de Eventos Geológicos. Informe interno Exploraciones Mineras Andinas S. A.
- Hermosilla, J., Pardo, R., 2020 (b). Procedimiento para la Determinación del Control de la Mineralización. Informe interno Exploraciones Mineras Andinas S. A.
- Plaza, L., 2021. Protocolo Operativo Mapeo de Sondajes Geológicos. Superintendencia de Geología, División Gabriela Mistral Codelco.
- Sillitoe, R.H., and Perelló, J., 2005. Porphyry copper systems: Economic Geology, v. 105, p. 3–41. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery: Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 845–890.

Efecto del tamaño de partículas y propiedades geológicas en la fragmentación y su aplicabilidad en la molienda

Fernando Stocker Oliva¹⁻²⁻³, Pía Lois Morales¹⁻², Kimie Susuki Morales¹⁻²

(1) Advance Mining Technology Center (AMTC), Tupper 2007, Santiago, Chile
 (2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas (DiMIN), Tupper 2069, Santiago, Chile
 (3) SRK Consulting Chile, Av. Vitacura 2939, Santiago, Chile

En minería, la reducción de tamaño de la roca va desde la escala métrica a micrométrica en la molienda. A lo largo del proceso de reducción de tamaño, la resistencia de la roca está condicionada por las características geológicas y los factores geométricos de las partículas. La propagación de esfuerzos y energía requerida para fragmentar una roca cambia según su tamaño y forma. A escala métrica, las discontinuidades u orientaciones preexistentes de la roca tienen una mayor incidencia en la resistencia a la fragmentación por sobre las propiedades mecánicas de los minerales; mientras que, en escala de partículas, la resistencia está condicionada por la microtextura y minerales presentes que conforman los planos de debilidad para la fractura. El efecto del tamaño de las partículas sobre las propiedades geomecánicas ha sido poco estudiado para rangos de tamaño <20 mm; existiendo poco consenso en cómo afecta la resistencia mecánica de la roca, en etapas posteriores de reducción de tamaño, como la molienda del mineral. En este estudio, se cuantifican propiedades geológicas como mineralogía modal y parámetros texturales mediante QEMSCAN y procesamiento de imágenes; propiedades físicas y geomecánicas, mediante inmersión en agua, ensayos UCS y brasileño; para analizar el efecto del tamaño de partícula y propiedades geológicas cuantificadas en la variabilidad del UCS, módulos de deformación y resistencia a la tracción. Para realizar este análisis, se utilizan muestras de un depósito IOCG, en litologías de andesitas y magnetitas con una mineralogía relativamente homogénea y bajo grado de vetilleo. Cabe resaltar que los resultados muestran que, para muestras con tamaños entre 6 a 20 mm, existe una disminución del UCS y del módulo de Young al disminuir el tamaño de partícula. Mientras que en la razón de Poisson, no muestra tendencia; siendo consistente con lo que muestra la literatura. Específicamente, andesitas porfídicas presentan menor resistencia que sus equivalente afaníticos; mientras que andesitas con alto porcentaje de carbonatos y mayor densidad tienen menor resistencia que sus contrapartes no alteradas y mayor porcentaje de hematita. En cuanto a las magnetitas, aquellas con alto porcentaje de cuarzo y/o sulfuros presentan mayor resistencia que magnetitas masivas o con alto porcentaje de carbonatos. Por otra parte, existe correlación inversa entre densidad, porosidad y grado de orientación de los fenocristales, con la resistencia de la roca. En cuanto al módulo de Young, este se encuentra influenciado principalmente por la mineralogía modal. Esto demuestra que es importante caracterizar detalladamente las propiedades geológicas, dado que un mismo litotipo presenta variaciones importantes en su mineralogía o textura a escala de partícula. Adquirir conocimiento fenomenológico de la fragmentación y molienda permitirá que futuras investigaciones puedan generar modelos predictivos más robustos o escalar parámetros de resistencia en función del tamaño. Esto permitiría reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad geológica, reducir costos operacionales asociados a la molienda mineral o mejorar la toma decisiones operacionales en el procesamiento de minerales.

Palabras Clave: Geomecánica, Caracterización geológica, Resistencia a la compresión, Efecto del tamaño, Procesamiento de imágenes.

Financiamiento: Perteneciente al Proyecto FONDECYT N°11220631: Linking geotechnical and geological properties at the microscale to characterise the comminution potential of ores.

Agradecimientos: Agradecimientos al AMTC, DiMIN y laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad de Chile. Capstone Copper MSD y al equipo de investigación, entre ellos a la Dra Pía Lois Morales y Dra Kimie Susuki.

Referencias:

- Cai, M. & Kaiser, P. & Tasaka, Y & Maejima, T & Morioka, H & Minami, M. 2004. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Díaz, E., Pamparana, G., Voisin, L., Kracht, W. & Martínez, P. 2019. Exploring the effect of the geological texture at meso and micro scale on grinding performance, Minerals Engineering, Volume 144, 2019, 106032, ISSN 0892-6875.
- Lois, P., Evans, C. & Weatherley, D. 2022. Analysis of the size-dependency of relevant mineralogical and textural characteristics to particles strength, Minerals Engineering, Volume 184, 2022, 107572, ISSN 0892-6875, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107572>.
- Masoumi. 2013. Investigation into the mechanical behavior of intact rock at different sizes. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of civil and environmental engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Popov, O., Talovina, I., Lieberwirth, H. & Duriagina, A. 2020. "Quantitative Microstructural Analysis and X-ray Computed Tomography of Ores and Rocks—Comparison of Results" Minerals 10, no. 2: 129. <https://doi.org/10.3390/min10020129>.
- Parapari, P., Parian, M & Rosenkranz, J. 2022. Quantitative analysis of ore texture breakage characteristics affected by loading mechanism: Fragmentation and mineral liberation, Minerals Engineering, Volume 182, 2022, 107561, ISSN 0892-6875.
- Quiñones, J., Arzúa, J., Alejano, L.R. et al. 2017. Analysis of size effects on the geomechanical parameters of intact granite samples under unconfined conditions. Acta Geotech. 12, 1229–1242 (2017).

Evolución erosional de botaderos mineros mediante Landlab

José Estay Herrera¹, Rodrigo Rauld Plott¹

(1) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre 194, oficina 61, Providencia, Santiago, Chile

La creciente actividad antrópica sobre la superficie terrestre ha catapultado a la humanidad a ser el principal agente de cambio geomorfológico del paisaje superficial terrestre, con tasas que han excedido las esperadas producto de los procesos naturales (Hooke, 2000; Wilkinson, 2005; Kemp et al., 2020). Aportan a estas tasas las actividades mineras que requieren del movimiento de grandes volúmenes de materiales geológicos como subproductos del proceso de extracción del recurso de valor (Wills & Finch, 2015). Comúnmente, el material más voluminoso generado corresponde al estéril, roca fragmentada suele ser almacenada en botaderos superficiales (Wills & Finch, 2015). Si bien el movimiento del estéril hasta el botadero es conocido e intencionado (en el sentido de Hooke, 2000), la evolución erosional posterior, producto de la acción de los procesos superficiales naturales propios del planeta, es poco conocida y no intencionada. Sin la implementación de medidas que permitan estabilizar y atenuar la erosión de las zonas perturbadas por la minería, no es posible conseguir una restauración e integración ecológica a largo plazo con las áreas circundantes.

En este estudio se analiza, vía modelación numérica de evolución del paisaje, la efectividad de las medidas de manejo implementadas sobre botaderos mineros de estéril. La medida de manejo implementada consiste en recubrir la superficie de los botaderos con una capa de suelo (mezcla de arena, limo y arcilla). La existencia de este sustrato permite la plantación artificial de vegetación al mismo tiempo que se facilita la colonización natural. Combinando componentes disponibles en la plataforma Landlab, un entorno de modelación de código abierto implementado en Python (Hobley et al., 2017a). La elevación topográfica del modelo resultó de la acción erosiva de los procesos superficiales gatillados por eventos de precipitación estocástica, y se incorporaron elementos de formación de suelo, y transporte de sedimentos por difusión y advección en las laderas y cauces, respectivamente. El modelo es capaz de simular dos capas con características geológicas diferentes, lo que permite hacer la equivalencia con (1) una capa inferior que representa al material estéril de los botaderos y (2) una capa superior que corresponde al suelo y los sedimentos resultantes de los procesos erosivos.

Es conocido que la adición de cobertura de suelo y vegetación induce una mayor resistencia del terreno a ser erosionado (e.g., Hancock et al., 2015; Schmid et al., 2018; Carriere et al., 2020; Hancock, 2021). Los resultados aquí presentados así también lo demuestran: mientras en el Caso I, sin medida de manejo de ningún tipo, la erosión y depositación fue intensa en vastas regiones luego de 200 años de evolución; el Caso IV, con cobertura de 100%, presenta solo indicios leves de movilización de sedimentos durante esa misma escala de tiempo. Adicionalmente, se evidencia que no es necesario tener una cobertura de vegetación altamente densa (100%) para atenuar de manera significativa la erosión. Solo con un 10% de densidad de vegetación, la magnitud promedio de la erosión predicha por el modelo, luego de 200 años de simulación, cae en más de un 80% con respecto al Caso I sin cobertura de ningún tipo.

Mediante el acoplamiento de los componentes: Expwi, DDTdiff, SPACE y Prec, se logran reproducir los patrones generales esperados para los procesos de transporte de sedimentos y una evolución geomorfológica. La integración de los componentes difusivo (DDTdiff) y advectivo (SPACE) permiten impulsar el transporte de sedimentos emulando favorablemente los procesos naturales de primer orden (deslizamientos, reptación, flujos de detritos, ríos, etc.) que son gatillados, en gran medida, por la escorrentía superficial producto de la precipitación. Adicionalmente, la capacidad de manejar dos capas geológicas dinámicas que representan, por un lado, los materiales propios del botadero en la parte inferior, y por el otro, los materiales superficiales como (1) el suelo añadido como medida de manejo y (2) los sedimentos resultantes de los procesos erosivos, permite otorgar realismo a la simulación. La serie de eventos de tormentas generada mediante el componente Prec logra reproducir eventos similares a los naturales registrados en el área estudio, por lo cual el modelo posee la impronta de la variabilidad en la precipitación propia del área. Finalmente, el componente de producción de suelo (Expwi) añade al modelo la degradación de los materiales geológicos en superficie, en el intento de representar la formación natural de suelo debido a la acción de los agentes físicos, químicos y biológicos.

Palabras Clave: Erosión, Simulación, Botaderos, Python, Plan de cierre.

Agradecimientos: A todo el equipo de CSDMS (Community Surface Dynamics Modeling Systems) detrás de la creación de Landlab.

Referencias:

- Carriere, A., Le Bouteiller, C., Tucker, G. E., Klotz, S., & Naaïm, M. (2020). Impact of vegetation on erosion: Insights from the calibration and test of a landscape evolution model in alpine badland catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), 1085–1099.
- Hancock, G. R., Lowry, J.B.C., & Coulthard, T. J. (2015). Catchment reconstruction - erosional stability at millennial time scales using landscape evolution models. *Geomorphology*, 231, 15–27.
- Hancock, G. R. (2021). A method for assessing the long-term integrity of tailings dams. *Science of the Total Environment*, 779, 146083.
- Hobley, D. E. J., Adams, J. M., Siddhartha Nudurupati, S., Hutton, E. W. H., Gasparini, N. M., Istanbuloglu, E., & Tucker, G. E. (2017a). Creative computing with Landlab: An open-source toolkit for building, coupling, and exploring two-dimensional numerical models of Earth-surface dynamics. *Earth Surface Dynamics*, 5(1), 21–46.
- Hooke, R. L. (2000). On the history of human as geomorphic agents. *Geology*, 28(9), 843–846.
- Kemp, D. B., Sadler, P. M., & Vanacker, V. (2020). The human impact on North American erosion, sediment transfer, and storage in a geologic context. *Nature Communications*, 11(1), 1–9.
- Schmid, M., Ehlers, T. A., Werner, C., Hickler, T., & Fuentes-Espoz, J. P. (2018). Effect of changing vegetation and precipitation on denudation - Part 2: Predicted landscape response to transient climate and vegetation cover over millennial to million-year timescales. *Earth Surface Dynamics*, 6(4), 859–881.
- Wilkinson, B. H. (2005). Humans as geologic agents: A deep-time perspective. *Geology*, 33(3), 161–164.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th Edition). Butterworth-Heinemann.

Estimación de valores de humedad en depósitos de relaves utilizando una aproximación petrofísica

Aaron Maximiliano Moya Paredes¹⁻²⁻³⁻⁴, Diana Comte Selman¹⁻⁴, Leopoldo Córdova¹⁻³, Adrien Dimech⁵, Daniel Díaz¹, Brian Townley²⁻⁴, Gisella Palma⁶

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) GeosinerGía: Ingeniería y Medio Ambiente, Departamento de Desarrollo Tecnológico, Av. Apoquindo 6433, Santiago, Chile

(4) Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Tupper 2007, Santiago, Chile

(5) Université du Québec, Research Institute of Mining and Environment (IRME), Abitibi-Témiscamingue, Canadá

(6) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

La estabilidad física en los depósitos de relaves se ve fuertemente afectada por la presencia de agua, lo cual lo convierte en un parámetro crítico a monitorear para garantizar la seguridad de estas estructuras y prevenir eventos que comprometan su seguridad, además de reducir al máximo los impactos ambientales. Además, los depósitos de relaves son estructuras complejas y dinámicas que presentan heterogeneidades en sus materiales, y pueden ocurrir simultáneamente diversos procesos internos y externos, los cuales deben ser considerados y monitoreados a gran escala, con el fin de asegurar la continuidad operacional de los depósitos y, por ende, la viabilidad de la industria minera.

Dado que uno de los parámetros de este monitoreo preventivo es el grado de saturación del material apilado, la medición periódica de la propiedad de resistividad eléctrica, sensible a la presencia de agua, es útil y puede lograrse utilizando la tomografía de resistividad eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés). Su capacidad de monitoreo a gran escala y su carácter no invasivo son útiles para la observación de los depósitos de relaves. Sin embargo, la interpretación de los resultados de la ERT requiere la determinación de múltiples parámetros físicos del sistema en estudio. El presente trabajo busca comparar cuantitativamente los resultados de la técnica de ERT y los ensayos de laboratorio de un depósito de relaves activo ubicado en la zona central de Chile, con el fin de determinar diferentes facies dentro del depósito y, por lo tanto, limitar la distribución de contenido de humedad predicha por la ERT, y otros parámetros de interés utilizando un enfoque petrofísico.

Los ensayos de laboratorio se llevan a cabo tomando muestras de material del muro del depósito de relaves, aplicando pruebas para evaluar el contenido mineralógico y químico, así como el arreglo geométrico dentro del depósito utilizando microscopía óptica y difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés). Además, estas muestras se someten a pruebas de diferentes grados de saturación para medir el parámetro de resistividad eléctrica. Esta caracterización se compara con los perfiles de resistividad obtenidos a partir de la campaña de ERT a través del depósito de relaves.

Palabras Clave: Relaves, Petrofísica, Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), Estimación de valores de Humedad.

Financiamiento: El presente trabajo presenta apoyo económico de GeosinerGía: Ingeniería y Medio Ambiente.

Criterios Geológicos para Manejo de Macizos Rocosos Reactivos al Explosivo en Base de Nitrato de Amonio - Seguridad en la Explotación Minera

Vicente Orellana¹, Héctor Villalobos¹, Javier Mendoza¹

(1) Enaex Servicios S.A., Gerencia EMTS, El Trovador 4253, Santiago, Chile

Las rocas o macizos rocosos reactivos (MRRx) son unidades geológicas que, al entrar en contacto con el explosivo, originan una reacción exotérmica espontánea, y en ocasiones violenta, generando un riesgo altamente crítico en el proceso de explotación minera. Este fenómeno se inicia con la reacción del nitrato de amonio presente en los compuestos explosivos y los productos resultantes de la meteorización de los sulfuros de hierro, como el Fe^{2+} , que puede liberarse de la pirita para formar ácido sulfúrico. El Fe^{2+} , al ser oxidado a Fe^{3+} en presencia de ácido sulfúrico y en contacto con el nitrato de amonio, experimenta una auto catálisis que produce energía en forma de calor que potencialmente puede desencadenar una detonación no planificada.

Actualmente, la capacidad de reacción de un material de roca con el explosivo es detectada en base a los siguientes ensayos de laboratorio:

- Análisis de Reactividad: mide la capacidad de reacción del material del macizo rocoso con el nitrato de amonio.
- Análisis de Sleep Time: mide el tiempo que puede permanecer el material del macizo rocoso sin reaccionar con el explosivo.

Investigaciones recientes, han permitido identificar minerales que, bajo condiciones físicas y geoquímicas específicas de la masa rocosa a tronar, pueden catalizar y reducir el tiempo de reacción del fenómeno reactivo.

El foco de este trabajo es conocer las variables geológicas de un macizo rocoso que intervienen en el potencial de reacción exotérmica con el explosivo, mediante la definición de una metodología que permita el manejo preventivo de MRRx, para la toma oportuna de medidas de control de los riesgos asociados, y el desarrollo de criterios georeactivos para establecer bases de uso de ciertos tipos de explosivos.

Contar con una sectorización geológica de la mina por potencial reactividad, definiendo zonas potencialmente reactivas o Unidades Georeactivas (UGRx), sustentan la construcción de un plan de Perforación & Tronadura, definen el tipo de explosivo por zona a utilizar y los tiempos operacionales del proceso de carguío y voladura en cada sector.

Para la caracterización georeactiva del macizo rocoso se desarrolló una metodología y herramientas de recolección de datos y análisis de mapeo de banco o superficie, que considera todas las variables y/o parámetros geológicos y geoquímicos, que permiten clasificar una UGRx.

Como información general para la zonificación georeactiva, se utilizaron los siguientes antecedentes:

- Modelos: litológico, mineralógico y de alteración, Pirita, Sulfuros Cu-Fe, estructuras mayores, hidrogeológico.
- Antecedentes de: tipo de relleno de fallas, condiciones de acidez de las aguas.
- Levantamiento georeactivo realizado en la zona de estudio, utilizando la cartilla de mapeo desarrollada por la unidad de geotecnia de Enaex.
- Registro de temperatura de pozos.

A partir del análisis de la información tanto del mapeo georeactivo como de los modelos utilizados se lograron establecer criterios georeactivos preliminares, para el manejo preventivo de los riesgos asociados a MRRx.

Palabras Clave: Rocas/Macizo Rocosos Reactivos (MRRx), Análisis de Reactividad y Sleep Time, Unidades Georeactivas.

Agradecimientos: Agradecimientos a: María Virginia Ramírez, Gerente de Explosivos Enaex Minera Los Colorados - CMP, por el apoyo en el desarrollo de trabajo en terreno Christian Mardones, Gerente EMTS-Enaex.

Referencias:

- Ramírez, María Virginia, 2022. Informes y procedimientos internos de rocas reactivas, Código Australiano, Informes de reactividad, laboratorio Río Loa – Enaex.

Application of historical copper slag for CO₂ sequestration

René Philippe Thibaut Quezada¹, Alexey Novoselov²

(1) E-Mining Technology S.A.

(2) Universidad de Concepción, Instituto de Geología Económica Aplicada, Concepción, Chile

The pyrometallurgical extraction of copper generates significant quantities of slag, historically considered as waste. In recent decades, extensive research has explored the potential applications of this material in construction, agriculture, and environmental remediation. This study focuses on the reuse of copper slag that is over one hundred years old, located in the Panulcillo village in northern Chile. We conducted a comprehensive analysis of the mineralogy and chemical composition of this aged copper slag using optical microscopy, QEMSCAN, and SEM analysis. In addition to identifying barren minerals and unrecovered Cu-bearing bubbles, we observed two potentially new phases: Ca-Si-rich and Fe-rich slag. These phases exhibit distinct shapes, BSE gray tones, and EDS spectra. Furthermore, we detected secondary calcite filling cracks and vesicles, indicating precipitation after slag cooling and weathering under typical atmospheric conditions. We also examined copper slag deposited several decades ago within the nearby La Cocinera tailing deposit. QEMSCAN and SEM characterization revealed a high proportion of sulphates over carbonates, suggesting possible post-cooling alterations influenced by the deposit's mineralogy. Subsequently, using methods of geochemical modeling, we explored a wide range of physico-chemical conditions to determine optimal parameters for capturing atmospheric CO₂ on this copper slag. The effects of temperature, CO₂ pressure, pH, water-rock ratio, mineral composition, fluid chemistry, and duration of interactions were tested. The dissolution of slag minerals and precipitation of secondary phases were simulated using the PHREEQC software. The model emulated dissolution and precipitation kinetics, decrease in dissolution rates near equilibrium, transport of ions and dissolved gasses by diffusion and the change in reactive surface area of minerals. To study the latter parameter, we conducted BET analysis on grinded slag samples. Our findings indicated that the most effective slag dissolution and highest amount of calcite precipitation occurred at pH = 8, a temperature of 40°C, a slag-to-water ratio of 10, and a reaction time of 20 to 40 days. Consequently, we conducted a laboratory experiment under these conditions, utilizing PET bottles as reaction vessels filled with copper slag, water, and air. The samples were placed in an oven for 6 months. In addition, we investigated the potential of seawater as an alternative fluid to reduce operational and environmental costs in practical applications. Confirming previous findings for Ca-rich iron and steel slags, our experiments with copper slag and seawater have also demonstrated effective calcite precipitation. The amount of calcite formed in seawater was comparable to or even higher than that observed in pure water. Based on the results of our research, we can conclude that the Panulcillo slag has the capacity to release Ca from its mineral structure under slightly modified ambient conditions. Seawater emerges as a more sustainable and cost-effective alternative for conducting carbonation processes.

Palabras Clave: Copper slag, CO₂ sequestration, Mining waste, Geochemical modeling.

Financiamiento: Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción.

Geología del Proyecto Cordillera, evidencias de un sistema epitermal de alta sulfuración localizado en la Franja de Maricunga, Chile

Magaly Antileo¹, Guillermo Peralta², Francisco Alfaro³

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Angold Resources Ltd, Chief Exploration Manager, Vancouver, Canadá

(3) Universidad Católica del Norte, Geología, Antofagasta, Chile

El proyecto Cordillera se encuentra ubicado en la Franja de Maricunga, Chile. Es un sistema mineralizado tipo epitermal de alta sulfuración rico en Au. Su principal zona de interés corresponde a la parte central del proyecto, con estructuras de cuarzo subparalelas y de orientación NO-SE, donde se han identificado trabajos históricos de minería artesanal a través de un pequeño *open-pit*, y cuyos valores en superficie alcanzan los 23,10 g/t Au. La empresa Angold Resources, en su reciente programa de exploración, ha permitido descubrir nuevos blancos de prospección epitermal dentro del proyecto e identificar una zona de rodados de intrusivo cuarzo diorítico, con vetillas negras de cuarzo bandeado; atribuibles, en primera instancia, a un sistema pórfido en profundidad.

La geología se caracteriza por secuencias volcánicas y sedimentarias intercaladas, que comprenden a las unidades descritas regionalmente como Estratos de Aguas Blancas, Fm. Lagunillas y Fm. Quebrada Monardes, cuyas edades van desde el Triásico Superior hasta el Paleoceno Inferior (Mpodozis et al, 2018); sobreyaciendo lo anterior y en discordancia angular, se deposita una secuencia de tobas líticas y tobas de cristales, de al menos 350 m de espesor, atribuible a la unidad Secuencia Volcánica Río La Gallina-Refugio, que va desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Inferior (Mpodozis et al, 2018). Las rocas de caja están instruidas por diferentes pórfidos dioríticos, de igual rango de edad que las indicadas tobas. Brechas hidrotermales y estructuras de cuarzo (*"ledges"* y vetas) mineralizadas, de tamaños variables (desde mm a decenas de centímetros), con edades atribuibles al Mioceno Medio, cortan las unidades mencionadas anteriormente. Lavas andesíticas post mineral cubren al menos un 45% del área mapeada, con ventanas erosivas que dejan al descubierto pequeñas unidades aflorantes de brechas hidrotermales, con alteración, principalmente cuarzo-alunita (cristalina hipógena); lo que sugiere una continuidad del sistema hidrotermal bajo cobertura.

La alteración (3,2 x 1,1 km), muestra una zonación afín a un sistema epitermal de alta sulfuración; la zona central se caracteriza por minerales de alta temperatura con cuarzo-alunita +/- pirofilita +/- dickita (obtenidos por espectrometría de reflectancia SWIR); asociados a texturas oquerosas tipo *"vuggy-silica"* que afectan a las estructuras de cuarzo y roca de caja. Graduando paulatinamente hacia afuera se identifica una extensa zona de alteración argílica avanzada, caracterizada por cuarzo-alunita +/- caolinita. La zonación continúa con alteración argílica, representada principalmente por caolinita y esmectita/illita. En la zona externa, se identifican alteraciones sericiticas, sericita-clorita, clorita y clorita-epidota.

El extenso sistema de fallas que afecta el sector, de orientación preferente NO-SE y secundario NE-SO, es considerado como el principal control en el emplazamiento de los cuerpos intrusivos y de las brechas hidrotermales. Así mismo, las estructuras de cuarzo siguen la orientación predominante NO-SE, y por consecuencia la distribución principal de la mineralización también presenta dicha orientación. Por su parte, un marcado lineamiento estructural NO-SE en el centro del área mapeada, separa el proyecto en dos bloques (noreste y suroeste), ambos bloques se diferencian por su nivel de erosión/exposición, siendo el bloque noreste el de mayor erosión, y por resultado una mayor exposición de las unidades intrusivas. Es en este sector donde se reconocieron los rodados de vetillas negras de cuarzo bandeado, pero su origen aún no ha sido determinado.

Mineralización aurífera ha sido reconocida asociada a brechas hidrotermales y estructuras de cuarzo; ambas con abundante presencia de óxidos de hierro negros indiferenciados que ocurren en las cavidades producidas por la lixiviación, como así también en la matriz de las unidades de brechas. En ocasiones, se ha reconocido enargita asociada a esos óxidos negros, como así también otros minerales de cobre como crisocola y brocantita, distribuidos en forma de patinas sobre las rocas intrusivas y rocas de caja.

La distribución espacial del oro proveniente del muestreo de finos de talud (564 muestras), indica una orientación preferente NO-SE; la cual coincide con la dirección de las estructuras mineralizadas, y con el sistema de fallas dominante. Valores significativos en finos de talud reportan un rango de 26,3 ppb a 460,93 ppb - Au; mientras que el muestreo en roca (349 muestras), muestran valores entre 0,3 g/t hasta 23,10 g/t - Au. En zona de cobertura, se reportaron anomalías de hasta 40, 2 ppb- Au en muestras de suelo, y 0,98 g/t Au en muestras de rocas, lo que indicaría la extensión del sistema mineralizado por debajo de la cobertura volcánica post-mineral.

Palabras Clave: Maricunga, Exploración, Alta Sulfuración, Vetas Epitermales.

Agradecimientos: Agradecemos a Angold Resources por su autorización para publicar este trabajo.

Referencias:

- Alfaro, F. (2021). Informe de Mapeo Geológico del Proyecto Cordillera (interno), Angold Resources.
- Alfaro, F. & Antileo, M. (2022). Informe de Mapeo de Detalle 1/500 y 1/1.500. Proyecto Cordillera – Zona A (interno), Angold Resources.
- Mpodozis, C., Clavero, J., Quiroga, R., Droguett, B. & Arcos, R. (2018). Geología del área Cerro Cadillal – Cerro Jotabeche. Región de Atacama. Escala 1:100.000: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica 200, 94 p.

Geología del Proyecto Dorado y evidencias de nuevos blancos de exploración tipo pórfido de oro, localizados en la Franja de Maricunga, Chile

Magaly Antileo¹, Guillermo Peralta², Francisco Alfaro³

(1) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Angold Resources Ltd, Chief Exploration Manager, Vancouver, Canadá

(3) Universidad Católica del Norte, Geología, Antofagasta, Chile

Resumen

El proyecto Dorado se encuentra ubicado en la Franja de Maricunga, Chile. Es un sistema mineralizado tipo pórfido rico en Au, sobrepuesto por eventos epitermales, donde su principal zona de interés es el histórico depósito Lajitas, que posee un recurso de 425.399 oz @ 0,5 g/t Au. (*recurso no actual*). La empresa Angold Resources, en su reciente programa de exploración, ha permitido verificar y expandir el recurso histórico, descubrir nuevos blancos de prospección, e identificar una segunda zona mineral (Lajitas Sur), al sur del depósito Lajitas. La geología de Dorado se caracteriza por la presencia un complejo de brechas explosivas de origen freatomagmático e intrusiones que cortan la secuencia volcánica de edad (Oligoceno)-Mioceno; en ellas se hospeda mineralización aurífera asociada principalmente a vetillas bandeadas de cuarzo, las que han sido reconocidas en las principales áreas del proyecto. La alteración predominante corresponde al tipo argílica intermedia con presencia de esmectita-ilita-clorita-carbonato; mientras que en las partes someras y en los márgenes del sistema pórfido, se han reconocido alteración argílica avanzada asociado al evento supérgeno primario, caracterizada por cuarzo-alunita-caolinita y caolinita-alunita. Preservación del sistema hidrotermal se ha reconocido hacia los límites orientales de la zona de trabajo, con evidencias de paleo-superficies en afloramientos de travertinos, sinter silíceo y niveles sub-erosionados de alteración por vapor (*steam-heated*); con una diferencia de nivel aproximada de 150 m con respecto al principal depósito.

1. Introducción

El proyecto Dorado se ubica en el Cinturón Metalogénico de Maricunga de edad Oligoceno-Mioceno (Vila y Sillitoe, 1991; Mpodozis et al., 1995), que se caracteriza principalmente por la ocurrencia de sistemas de pórfidos ricos en oro (ej., Cerro Casale, Caspiche, Lobo-Marte), y en su parte norte por sistemas epitermales de alta sulfuración (ej., La Coipa, Esperanza, La Pepa, Salares Norte - Vila y Sillitoe, 1991).

El control estructural de la mayoría de los reconocidos yacimientos y prospectos localizados en la Franja de Maricunga, (ej. Lobo-Marte, Soledad, El Volcán), ocurren en la intersección de estructuras dominantes del norte-noreste con las estructuras subordinadas orientadas al noroeste (Mercado, 1982; Vila & Sillitoe, 1991).

En Dorado, su principal área de interés es Lajitas, un depósito de estilo pórfido rico en Au, sobrepuesto por eventos epitermales (alteración y vetas), con escasas evidencias de un lithocap erosionado en los márgenes del depósito. El complejo magmático-hidrotermal de Dorado está alojado en rocas volcánicas e intrusivas del (Oligoceno)-Mioceno Medio, expuestas a través de una ventana erosiva, ubicada al margen occidental de la Caldera Lajitas (Naranjo et al., 2019), y controlado por fallas N-S a NNW, E-W a NNW y principalmente por estructuras NW (Toro y Muehlebach, 1997).

Desde su descubrimiento en década del 80' y comienzo de su exploración hacia finales del 1996, las empresas que estuvieron a cargo de Lajitas (Santa Fe Pacific y Capella Resources), realizaron esporádicas campañas de perforaciones, en conjunto con mapeos de superficie, aperturas de caminos y trincheras. Las perforaciones antiguas (en su mayoría RC), totalizaron al 2011, poco más de 10,000 metros, lo que permitió calcular un recurso estimado de 425.399 oz @ 0,5 g/t Au para el depósito (Cole, 2011). No obstante, los recientes trabajos de exploración de Angold Resources permitirían incrementar el recurso mineral, por lo que dicho valor representa una base histórica, y no actual.

En el año 2020, el proyecto fue adquirido por Angold Resources; que inicia su programa de exploración a finales de dicho año; focalizado principalmente en la zona mineral de Lajitas, con una campaña de perforación de más de 4.500 m de diamantina, con el objetivo de verificar y expandir el recurso histórico del depósito.

Así mismo, se completó un programa de mapeo y muestreo geológico de superficie, una extensa malla de muestras de suelos (finos de talud), estudios hiper-espectrales en imágenes. Además, se mapeó los sondeos, con su correspondiente análisis geoquímico de oro y multi-elementos; y posterior modelamiento geológico, con integración de toda la información obtenida.

La prospección geológica en superficie, respaldada por muestreo geoquímico e interpretación espectral, se extendió al resto de la propiedad minera (>15.000 ha), y permitió la identificación de otras zonas de interés exploratorio. Entre estas, se destaca el sector Lajitas Sur, que, por primera vez, se identificó la presencia de vetillas bandeadas de cuarzo, fuera de la zona principal del proyecto, acompañadas de significativas anomalías de contraste auríferas en muestras de suelo y rocas.

El objetivo de esta publicación es resumir los resultados obtenidos de esta última campaña de exploración, a fin de actualizar el marco geológico del Proyecto Dorado, y poner de manifiesto nuevos blancos estilo pórfido localizados en la propiedad.

2. Resultados del Mapeo Geológico

2.1. Geología y Alteración

El área principal del proyecto se describe como una ventana erosiva que expone rocas volcánicas e intrusivas del (Oligoceno)-Mioceno Medio (Naranjo et al, 2019), emplazadas a ambos lados del valle del río Lajitas e interpretado como un centro volcánico erosionado (Hopper, 2020). Sin embargo, también se interpreta, como el margen occidental de la denominada Caldera Lajitas (Naranjo et al, 2019). La geomorfología presenta pendientes abruptas y de gran desnivel, desde aprox. 4.400 msnm en el cauce del río hasta los 5.200 msnm hacia las cumbres más prominentes ubicados al sur.

La edad de Dorado, incluyendo el depósito Lajitas y demás zonas de interés, se estima en un rango entre los 15 Ma y 8 Ma, de acuerdo con dataciones en cercanías del depósito, publicadas por Naranjo et al., 2019; pero en la actualidad no hay datos de edad radiométrica específicos para las fases intrusivas y de mineralización.

Las unidades litológicas corresponden a diferentes cuerpos intrusivos (pórfidos), y brechas (en su mayoría freato-magmáticas), que intruyen y cortan a secuencias volcanoclásticas y tobáceas. Estas rocas están cubiertas parcialmente por depósitos volcánicos del Mioceno Superior – Plioceno Inferior.

Las rocas intrusivas varían en su composición, de dioríticas a granodioríticas, y presentan textura porfídica. Los diferentes cuerpos reconocidos a través del mapeo de superficie y perforación presentan características texturales específicas para cada unidad, que incluyen diferencias en tamaño y arreglo de los cristales, así como la abundancia relativa de los minerales formadores de roca.

Las brechas con mayor volumen en el área se han clasificado como un complejo de brechas freato-magmáticas. La más importante aflora en el centro mineralizado de Lajitas y hospeda parte de la mineralización aurífera (Fig.1a). Los clastos que integran el complejo de brechas son polimícticos, con composiciones que varían de andesíticos a dacíticos. Algunos clastos pertenecen a pórfidos con vetillas truncadas (vetillas bandeadas de cuarzo), y clastos juveniles en algunas partes de la brecha. El tamaño de los líticos es seriado, alcanzando hasta unos 30 cm de diámetro y tienen mala selección. La matriz está conformada por polvo de roca y fragmentos de cristales, con predominio de alteración filica.

Otras unidades relevantes son brechas hidrotermales indiferenciadas, que afloran en diferentes lugares del proyecto como pequeños cuerpos. Suelen tener un arreglo tipo “crackle breccia” con cemento conformado por óxidos de hierro y/o sulfuros (Alfaro, 2021).

Unidades aflorantes que representan paleo-superficies han sido mapeadas en el extremo noreste del área de estudio, sector Ruby (Dietrich, 2021), y corresponden principalmente a depósitos de travertino y de sinter silíceo, ambos relacionados a sistemas geotermales fósiles. Hacia el margen sur del río Lajitas se han reconocido rodados de sinter silíceo y un pequeño afloramiento de travertino, lo que permitiría suponer una continuidad de la paleosuperficie hacia ambos lados del río (Alfaro, 2021).

La alteración hidrotermal expuesta en el sector prospectado, supera los 6 km², siendo la alteración principal del proyecto correspondiente al tipo argílica intermedia, con asociación illita-esmectita±clorita±carbonato, en donde la mayor intensidad y sobreimposición con otras alteraciones, se ubica en el centro mineralizado de Lajitas, y afecta tanto a las unidades de brechas como a los diferentes pórfidos relacionados a mineralización.

Alteración argílica avanzada definida por las asociaciones cuarzo±alunita±caolinita o caolinita±alunita±cuarzo afectan a diferentes litologías y alteraciones preexistentes, sobreimponiéndose a éstas, y se desarrollan hacia el extremo noreste de Lajitas y el borde de Lajitas Sur.

La alteración supérgena primaria (*steam-heated*), está caracterizada por una fuerte presencia de cuarzo±alunita±caolinita±azufre, y con textura de aspecto pulverulento, parcialmente preservada, que se exhibe como evidencia hidrotermal de las unidades de paleo-superficie descritas en el proyecto (Dietrich, 2021).

Hacia las profundidades de la zona de perforación de Lajitas, coincidente con la parte alta de un intrusivo temprano, se han reconocido minerales de alta temperatura relacionados con evidencias relictas de alteración potásica con magnetita±biotita±esmectita y magnetita-esmectita-clorita en brechas. Esta alteración está fuertemente afectada por la sobreimposición de alteración argílica intermedia.

2.2. Mineralización

La mineralización de oro está estrechamente relacionada a la presencia de vetillas bandeadas de cuarzo (BQZ); como aquellas descritas en depósitos de pórfidos de oro de la Franja (Vila y Sillitoe, 1991; Muntean y Einaudi, 2001). De manera secundaria, la mineralización se encuentra diseminada, tanto en cuerpos intrusivos como en la matriz de brechas.

En el área central de Dorado, las vetillas se encuentran cortando diferentes unidades de pórfidos y rocas de cajas, concentrándose principalmente en el complejo de brechas. Es en este complejo donde por sectores aparecen tanto clastos líticos con vetillas truncadas, como también vetillas cortando a las brechas mismas, lo que le daría una temporalidad inter-mineral a esta unidad.

No obstante, en las unidades de pórfidos que hasta el momento han sido reconocidos, no se han evidenciado fases inter-minerales, por lo que podría conjeturarse que la zona de mayor importancia mineral aún no ha sido alcanzada por las perforaciones, dejando abierto el sistema tanto en profundidad como lateralmente.

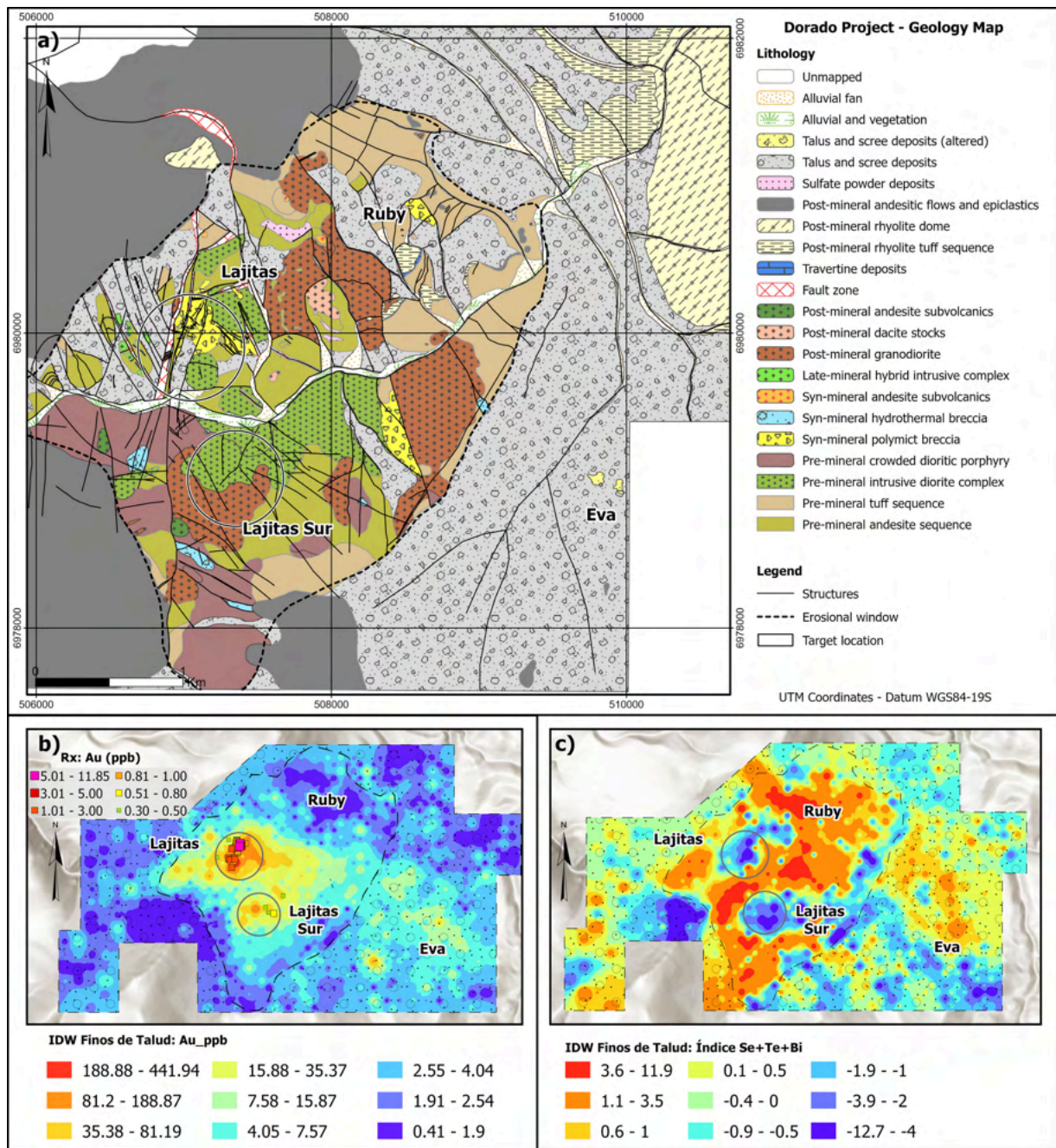


Figura 1. a) Mapa geológico del Proyecto Dorado. Superficie cubierta de mapeo a >26 km²; **b)** Distribución espacial del Oro (Rx: Roca, IDW: Interpolación Inverso a la Distancia); **c)** Distribución espacial del índice Se+Te+Bi. La cobertura incluye sedimentos, en su mayoría gravas, y unidades de lavas post-mineral.

Previamente a la última campaña de perforación, el tamaño de la mineralización del depósito Lajitas implicaba un área proyectada en superficie de aproximadamente 300 x 280 m, que se distribuía en dos cuerpos elongados hacia profundidad con dirección NNE. Sin embargo, los sondeos realizados en 2021 permitieron extender la mineralización lateralmente en al menos al doble de lo conocido, debido a los *step-out* realizados, como así también en profundidad debido a los sondeos profundos que terminaron en mineralización. Algunos de los mejores interceptos alcanzan los 302 m @ 0,71 g/t Au que incluye 68 m @ 1,3 g/t Au (DO-21-01); 248 m @ 0,75 g/t Au que incluye 74 m @ 1,25 g/t Au (DO-21-03) y 110 m @ 0,75 g/t Au que incluye 32 m @ 1,11 g/t Au (DO-21-02).

2.3. Estructuras

Dorado no está ajeno a la complejidad estructural de la Franja de Maricunga, donde se evidencian diferentes eventos tectónicos sobreimpuestos (Toro y Muehlebach, 1997). Las estructuras con mayor expresión mapeadas son fallas de tendencia N-S, NNE, NNW, NE y NW, y en menor importancia E-W. Esta última, que transcurre a lo largo de la quebrada del río Lajitas, pareciera ser la estructura que controla el alzamiento del bloque norte (Lajitas), con relación al bloque sur (Lajitas Sur).

Por otro lado, en el extremo oriental del mapa, los bloques descienden escalonadamente hacia el margen de la Caldera Lajitas (Fig.1a), lo que se refleja en la ocurrencia de unidades sedimentarias post-minerales (gravas en su mayoría), y preservación de los niveles de paleo-superficie.

En similitud con otros depósitos del sector, los sistemas con orientación NNE y NW tienen el control sobre la mineralización del proyecto (Dietrich, 2021), y es a lo largo de estas orientaciones donde se distribuyen tanto las anomalías de oro como de los elementos trazadores.

3. Resultados Geoquímicos

3.1. Distribución del Oro

La distribución espacial del oro proveniente del muestreo de finos de talud, indica una orientación preferente de dirección NW-SE; la cual coincide con la dirección de estructuras mineralizadas de índole regional y distrital en la Franja de Maricunga. En contraste, los cuerpos mineralizados reconocidos por sondajes en el depósito Lajitas, como así también valores de oro en rocas, trincheras y caminos en ese sector, evidencian una orientación secundaria de sentido NNE.

Las mayores concentraciones de oro, en superficie, se concentran en dos áreas (Lajitas y Lajitas Sur). En el área norte (Lajitas), valores significativos en finos de talud reportan un rango de 100 ppb a 442 ppb - Au; mientras que en roca los valores van desde 0,3 g/t hasta 11,85 g/t - Au. Mientras tanto, en Lajitas Sur, los suelos reportan anomalías en un rango de 40 ppb a 189 ppb - Au, y los resultados de media docena de muestras de roca muestran anomalías sobre 0,3 g/t - Au (por mencionar algunos, 0,63 g/t Au 0,48 g/t Au, 0,43 g/t Au). Estos últimos valores, corresponden a los hallazgos de vetillas bandeadas de cuarzo que por primera vez fueron identificadas en la zona (Fig.1b)

Una tercera zona de concentración de anomalías auríferas se identifica al sureste del área mapeada/muestreada (sector Eva), la cual se encuentra bajo cobertura sedimentaria y post-mineral, lo que da a suponer de una posible existencia de un sistema hidrotermal soterrado. Mayores trabajos de exploración en esta área están planificados realizarse en las siguientes campañas.

3.2. Distribución elementos Trazadores

La interpretación de datos permitió definir ciertos comportamientos de distribución de los elementos trazadores, concluyendo por ejemplo que la distribución espacial de las anomalías de contraste por cobre, guardan estrecha relación con la distribución del oro, característico de los pórfidos de Maricunga.

Por otro lado, existe una fuerte correlación entre la distribución espacial de los elementos telurio, selenio y bismuto en ciertos sectores del proyecto (Fig.1c). Una de estas zonas se encuentra en el margen exterior de Lajitas Sur, que se expone con una destacada geometría sub-circular, y cuya forma coincide coherentemente con la disposición de las alteraciones argílica y argílica avanzada del sector. La segunda zona de fuerte correlación entre los mencionados elementos se localiza hacia el extremo noreste del área de mapeo, coincidente con la zona de alteración de alteración por vapor (*steam-heated*).

3.3. Integración e Interpretación de Datos

Bases de datos unificadas de geoquímica de multi-elementos, espectrometría y geología, permitieron la caracterización de diferentes ambientes hidrotermales en el proyecto. Dos dominios han sido claramente identificados: (i) pórfido rico en oro, donde se emplazan el depósito Lajitas y Lajitas Sur; (ii) dos dominios epitermales localizados a los márgenes externos de los pórfidos y hacia el bloque oriental del proyecto (Ruby).

Con respecto al ambiente pórfido, si bien existe una elevada correlación del Au con Cu, los contenidos en Cu son inferiores a 0,1%, en sondajes; por lo que se define al principal blanco, Lajitas, como pórfido de Au; similar a Marte y Lobo (Vila y Sillitoe, 1991). Mientras que, el dominio epitermal, tiene una marcada impronta de elementos volátiles, tales como: Se, Te y Bi; que se correlacionan entre sí, y coinciden espacialmente a las alteraciones argílica, argílica avanzada y zona supérgena primaria (Fig. 1c).

4. Conclusión y Comentarios

Dorado es un proyecto tipo pórfido rico en Au, que se encuentra expuesto a través de una ventana erosiva localizada en margen occidental de la Caldera Lajitas.

La geología se caracteriza como un complejo de brechas principalmente freato-magmáticas, de carácter inter-mineral y post-mineral; además de, intrusiones de pórfidos de composición diorítica, los que se exhiben en asociaciones "pre y post-mineral", quedando pendiente hallar el pórfido "intermineral". Por lo que se presume que la zona de mayor importancia mineral aún no ha sido alcanzada por las perforaciones, dejando abierto el sistema tanto en profundidad como lateralmente.

La mineralización aurífera, se asocia principalmente a vetillas bandeadas de cuarzo (QBZ), y en menor medida mineralización diseminada en la matriz de brechas e intrusivos. En similitud con otros depósitos del distrito, los sistemas estructurales con orientación NNE y NW tienen el control sobre la mineralización, y es a lo largo de estas orientaciones donde se distribuyen tanto las anomalías de oro como la de los elementos trazadores.

Además, un sistema hidrotermal preservado se localiza hacia los límites orientales del mapa, con afloramientos del ambiente supérgeno primario y afloramientos de travertinos y sinter silíceo.

Por último, la reciente exploración permitió expandir el recurso histórico de Lajitas, e identificar otras zonas de interés. Permitiendo diferenciar al menos dos ambientes de pórfidos de oro en el centro del proyecto, circunscriptos por ambientes epitermales. Un tercer blanco estilo pórfido podría reconocerse hacia el extremo oriental, soterrado bajo la cobertura sedimentaria, pero el estatus de trabajos actuales no permite concluir aún tal hipótesis.

Palabras Clave: Maricunga, Exploración, Pórfido, Vetillas bandeadas.

Financiamiento: Agradecemos a Angold Resources por su autorización para publicar este trabajo.

Agradecimientos: Agradecemos a Carlos Tellez y Brian Townley por sus comentarios y aportes. Agradecemos a Andreas Dietrich por el levantamiento de los mapas geológicos de superficie.

Referencias:

- Alfaro, F. (2021). Informe mapeo geológico Lajitas Sur (V.2). (Reporte interno)..
- Dietrich, A. (2021). Geological mapping of the Dorado (former Lajitas) project Maricunga Belt Chile (Internal Report).
- Cole, B (2011). Resource Estimation on the Dorado/Lajitas Gold Property, Maricunga Gold-Copper District Third Region, Republic of Chile, Technical report for Capella Resources Ltd.
- Hopper, D (2020). NI 43-101 Technical Report on the Dorado project (Formerly Lajitas), Atacama Region, Chile. – Report for Federal Gold Corp. and ZTR Acquisition Corp.
- Mercado, M. (1982). Hoja Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 56, 73 p. Santiago.
- Muntean, J.L. and Einaudi, M. T (2001). Porphyry-Epithermal Transition: Maricunga Belt, Northern Chile. Economic Geology. Vol. 96, 2001, pp. 743–772.
- Mpodozis, C, Cornejo, P, Kay, SM, Tittler, A (1995). La Franja de Maricunga: síntesis de la evolución del Frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. – Revista Geológica de Chile 21-2: 273-313.
- Naranjo, J.A.; Hevia, F.; Arcos, R.; Polanco, E. (2019). Geología de las áreas Nevado Ojos del Salado y Cerro El Fraile, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 204-205: 96 p.
- Toro, J.C y Muehlebach, N. (1997). Lajitas, Nuevo Descubrimiento en la Franja de Maricunga. Actas. Vol II, VIII Congreso Geológico Chileno 1180-1183.
- Vila, T and Sillitoe, RH (1991). Gold-rich porphyry systems in the Maricunga Belt, Northern Chile. - Economic Geology 86: 1238-1260.

Control geocronológico y estilos de mineralización de depósitos de la Carta Mejillones, región de Antofagasta

Claudia Silvia Arredondo Castillo¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología Aplicada, Unidad de Recursos Minerales, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

El área cubierta por la carta Mejillones y Península de Mejillones forma parte de la cordillera de la Costa de la región de Antofagasta, en donde afloran rocas intrusivas y volcano-sedimentarias del Devónico al Cretácico Inferior, cubiertas por secuencias sedimentarias continentales y marinas del Neógeno al Cuaternario (Cortés *et al.*, 2007). El marco geológico del sector está principalmente dominado por la evolución de un margen de subducción convergente desde el Jurásico al Cretácico Inferior, en un periodo de convergencia oblicua, caracterizado por volcanismo y plutonismo a lo largo de la cordillera de la Costa y disectado por el prominente Sistema de Fallas de Atacama, que se extiende de norte a sur, por más de 1.000 km, entre los 20 y 30°S, descrita como una falla de intra-arco, activa desde el Jurásico Medio hasta el Cretácico Inferior, con deformación frágil y dúctil. Esta superficie se inserta en la Provincia metalogénica de la cordillera de la Costa, cuyos depósitos más importantes corresponden a estratoligados de Cu y depósitos vetiformes de Cu-Au (Boric *et al.*, 1990), los cuales se describen a continuación.

Depósitos estratoligados de Cu-Ag: Incluye al depósito estratiforme Mantos Blancos, uno de los yacimientos de tipo estratoligado más importante del país, con estimaciones de recursos de 500 Mt de 1% Cu, que se emplaza en rocas volcánicas ácidas asignadas al nivel inferior de la Formación La Negra (Jurásico Inferior-Medio). De acuerdo con Cornejo *et al.* (2006) y Oliveros *et al.* (2008), el rango de edad de formación de este depósito sería ca. 148-142 Ma. También se incluye al yacimiento Iván-Zar, en el distrito El Desesperado, con recursos de 5,8 Mt de 2,3% de Cu que cuenta con una datación K-Ar y una $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de ca. 140 Ma.

Depósitos vetiformes de Au (mesotermiales): Vetas emplazadas en el gabro Mejillones (164-159 Ma), dioritoides Cerro Fortuna (154 Ma) y granitoides Cerro Fortuna (153 Ma), explotadas por Au mediante labores subterráneas en el distrito El Morado, cuyo rango de edades radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en sericita y actinolita, varía entre 156 a 149 Ma, indicativas del Jurásico Superior.

Depósitos vetiformes de Cu (IOCG): Vetas controlados por fallas y emplazados en monzodioritas, dioritas y granodioritas del Complejo plutónico Naguayán (181-170 Ma) y en menor proporción en lavas andesítico-basálticas de la Formación La Negra (Jurásico Inferior-Medio), en los distritos Naguayán y Sierra Miranda, explotadas principalmente por Cu, algunas con Au subordinado. Se obtuvo un rango de edad en minerales de alteración: Actinolita, feldespato potásico y albita, entre 175 y 140 Ma, las que se han interpretado en parte asociadas a mineralización, y en parte posiblemente afectadas por un evento térmico regional, y, por lo tanto, serían edades rejuvenecidas.

Palabras Clave: Estratoligados de Cu, mesotermiales Au, IOCG

Agradecimientos: Este trabajo se basa en la "Carta metalogénica de Mejillones y Península de Mejillones, a escala 1:100.000", en prep. y cuenta con el auspicio de la Subdirección Nacional de Geología de Sernageomin.

Referencias:

- Boric, R.; Díaz, F.; Maskaev, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 40: 246 p., 2 mapas metalogénicos escala 1:500.000. Santiago.
- Cornejo, P.; Latorre, J.J.; Mathews, S.; Marquardt, C.; Toloza, R.; Basso, M.; Rodríguez, J.; Ulloa, C. 2006. U/Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Región, Chile. In Congreso Geológico Chileno No. 11, Actas, Vol. 2: pp. 223-226. Antofagasta.
- Cortés, J.; Marquardt, C.; González, G.; Wilke, H-G.; Marinovic, N. 2007. Cartas Mejillones y Península Mejillones, región de Antofagasta. Servicio nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, Nos. 103 y 104, 58 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Oliveros, V.; Féraud, G.; Aguirre, L.; Ramírez, L.; Fornari, M.; Palacios, C.; Parada, M. 2008. Detailed $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. Mineralium Deposita V. 43, pp. 281-293.

Depósitos mesotermales de oro del Jurásico Superior en la región de Valparaíso, Chile

Claudia Silvia Arredondo Castillo¹, Roxana Isabel Ortega Bustamante¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología Aplicada, Unidad de Recursos Minerales, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

En la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa de la región de Valparaíso se han reconocido depósitos caracterizados por mineralización aurífera vetiforme, cuya explotación se remonta a tiempos de la Colonia, a partir de la segunda mitad del siglo XVI. Entre ellos, se incluye el depósito Pullalli, cercano a la ciudad de La Ligua, con recursos de 630.000 oz de Au, explotado como mediana minería entre el 2000 al 2016. También incluye el distrito Cerro Álamo, ubicado a 23 km al suroeste de la ciudad de Quilpué, en la cabecera del estero Marga Marga, que ha sido explotado de manera intermitente, mediante labores artesanales o faenas de pequeña minería en los depósitos Isis y Anita de Tapihue.

La provincia metalogénica de la cordillera de la Costa representa una etapa tectónica que abarca del Jurásico al Cretácico Inferior, caracterizada como un margen convergente de subducción, con un arco magmático calcoalcalino, con el desarrollo de una cuenca de trasarco hacia el este. Predomina un ambiente tectónico extensional, que cambia a un régimen compresivo, en el periodo entre los 110 y 80 Ma, que produce la inversión de la cuenca de trasarco y el alzamiento de la cordillera de la Costa (Mpodozis y Ramos, 1990; Boyce *et al.*, 2020).

Descripción

Estos depósitos están alojados en rocas volcánicas y sedimentarias marinas del Triásico-Jurásico, representadas por domos riolíticos, areniscas, conglomerados y lutitas, coladas de lava y rocas piroclásticas andesíticas, y en rocas intrusivas del Jurásico, que varían de gabro a granito. Se caracterizan por corridas entre 10 y 1.500 m, potencias entre 0,3 y 6 m, y profundidades entre 20 y 90 m, aunque pueden llegar hasta los 230 m en el depósito Anita de Tapihue. La mineralogía de mena incluye oro nativo, *electrum*, calcopirita, bornita y covelina; la mineralogía de ganga es cuarzo, calcita, baritina, ankerita y dolomita, magnetita, pirita, pirrotina, arsenopirita, especularita y rutilo. Se reconoce una alteración como halos cuarzo-sericiticos, escasa silicificación, y clorita como reemplazo selectivo de fenocristales máficos. Además, también se encuentra una asociación de alta temperatura, con feldespato potásico-biotita y andalucita-muscovita en Pullalli (López y Ballón, 2015), mientras en el depósito Fabiola, ubicado a 5 km al noreste de Pullalli, se reconoce muscovita y actinolita. En el depósito Anita de Tapihue del distrito Cerro Álamo, se ha descrito cuarzo y muscovita gruesa, alteración que también ha sido observada por Townley *et al.* (2000) en el sector sur del distrito minero Marga Marga, e identificada como tipo greisen asociada a diques félsicos. La zona oxidada de las vetas está caracterizada por una alteración argílica supérgena, hasta 40 m de profundidad, integrada por arcillas, limonitas, más oxidados de cobre como malaquita, atacamita y crisocola.

Las vetas tienen formas lenticulares y tabulares de rumbo preferencial NE-SO, manteos subverticales a verticales, y emplazadas tanto en zonas de cizalla de rumbo NE-SO con foliaciones penetrativas y milonitas asociadas representativa de una condición dúctil, como en brechas cataclásticas y zonas de salbanda asociadas a fallas de ambiente frágil. Estos sistemas de vetas se relacionarían con las fallas regionales de rumbo NO-SE a ONO-ESE que, según Creixell *et al.* (2011) serían estructuras heredadas, al menos, desde el Jurásico Medio, y que controlarían los movimientos de bloques en la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa.

Las edades radiométricas disponibles de Ortega *et al.* (2021), incluyen una datación ⁴⁰Ar/³⁹Ar en muscovita en el depósito Fabiola de 155±3 Ma. Además, en el depósito Isis se obtuvo una datación K/Ar en roca total, realizada en una muestra proveniente del halo de alteración sericitico, que reportó una edad de 154±5 Ma, aunque otra edad K-Ar en roca total del halo de alteración reportó 138±4,4 Ma, la que es interpretada como una edad rejuvenecida por las intrusiones del Cretácico Inferior. Mientras en el depósito Anita de Tapihue, se obtuvo una datación ⁴⁰Ar/³⁹Ar en muscovita, proveniente del halo de alteración de las vetas de cuarzo, de 156,44±0,16 Ma.

Conclusiones

Los depósitos vetiformes de Au son interpretados predominantemente como de tipo mesotermal debido a su mineralogía de mena, ganga y alteración, se habrían formado en un lapso de ca. 156 a 154 Ma, de acuerdo con las dataciones radiométricas obtenidas en los depósitos Fabiola (155 Ma), Isis (154 Ma) y Anita de Tapihue (156 Ma), y, por lo tanto, serían contemporáneos a los pulsos de intrusivos jurásicos del lapso 165 a 145 Ma.

Palabras Clave: Provincia metalogénica, mesotermal.

Agradecimientos: Este trabajo se basa en la publicación "Depósitos metalíferos de la región de Valparaíso, escala 1:500.000", y cuenta con el auspicio de la Subdirección Nacional de Geología de Sernageomin.

Referencias:

- Boyce, D.; Charrier, R.; Fariás, M. 2020. The first Andean compressive tectonic phase: Sedimentologic and structural analysis of mid-Cretaceous deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics* 39: 24 p.
- Creixell, C.; Parada, M.; Morata, D.; Vásquez, P.; Pérez de Arce, C.; Arriagada, C. 2011. Middle-Late Jurassic to Early Cretaceous magmatism and transpression during arc building in Central Chile: evidence from mafic dike swarms. *Andean Geology* 38 (1): 37-63.
- López, C.; Ballón, A. 2015. Mecanización Mina Pullalli. Informe interno (Inédito), Compañía Minera Pullalli: 87 p. Cabildo.
- Mpodozis, C.; Ramos, V.A. 1990. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its Relationship to Hydrocarbon and Mineral Resources* (Erickson, G.E.; Cañas, M.T.; Reinemund, J.A.; editors), Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series 11: 59-90.
- Ortega, R.; Moscoso, R.; Arredondo, C.; Águila, B.; Mateo, L.; Pantoja, G. 2021. Depósitos metalíferos de la región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie de Recursos Minerales y Energéticos 36: 219 p., 1 mapa escala 1:500.000. Santiago.
- Townley, B.; Maskaev, V.; Palacios, C.; Hernández, T.; Hurtado, R.; Jorquera, R.; González, E. 2000. Mineralización aurífera en la cordillera de la costa en Chile central: distritos Antena (V región) y Colliguay (Región Metropolitana). In *Congreso Geológico Chileno*, No 9, Actas 2: 171-175. Puerto Varas.

Modelamiento de los estilos de mineralización de sulfuros de cobre en el yacimiento Río Blanco y su impacto en la recuperación de cobre de la División Andina de CODELCO

Nicolas Cabello Sagredo¹⁻², Ricardo Vargas Rojas², Claudio Martínez Martínez³, Marcos Sole Milla², Francisco Marín Guajardo³

(1) Universidad Andres Bello, Escuela de Geología, Facultad Ingeniería, Santiago, Chile

(2) CODELCO División Andina, Área de Recursos Geológicos, Superintendencia de Geología, Los Andes, Chile

(3) CODELCO División Andina, Área de Geometalurgia y Mineralogía, Superintendencia de Geología, Los Andes, Chile

El yacimiento Río Blanco ubicado en la Región de Valparaíso en Chile, es un pórfido de cobre-molibdeno operado por la División Andina de CODELCO desde el año 1970. El yacimiento cuenta con aproximadamente 2.772 millones de toneladas de recursos medidos y estimaciones de recursos totales que ascienden a 21.969 millones de toneladas. Su génesis tuvo lugar durante el Mioceno tardío al Plioceno temprano, marcada por episodios de engrosamiento y deformación cortical, solevantamiento y migración del arco magmático andino hacia el este, los cuales fueron producidos por variaciones en el régimen tectónico y el desarrollo de un flat-slab. La principal mena explotada es la calcopirita, que se asocia con bornita en facies profundas y, en menor cantidad, con minerales supérgenos como la calcosina (<1%). El mecanismo de recuperación de cobre del tonelaje extraído es a través de flotación en celdas de tipo *Rougher*.

Se ha establecido previamente que los estilos de mineralización de la mena y ganga pueden influir en el proceso de flotación y recuperación, debido a que pueden controlar en cierta medida el grado de liberación de las partículas posterior al chancado. Tamaños gruesos de conminución tienden a presentar mineral de mena encapsulado u ocluido dentro de partículas de ganga, lo que dificulta el proceso de recuperación debido a la obstaculización, reducción o ausencia de superficie de contacto con el fluido reactivo. En contraste, los tamaños finos de conminución producen un mayor grado de liberación de partículas, pero también una reducción de la probabilidad de colisión partícula-burbuja en la flotación, lo que igualmente dificulta la recuperación.

El análisis de la base de datos de mapeo de la mina evidencia sectorización de los estilos de mineralización, por lo que el desarrollo de un modelo tridimensional que describa estas zonas con el fin de estudiar su impacto en la recuperación ligada al grado de liberación de los sulfuros en el proceso de flotación, es viable.

Se cuenta con 370 km de mapeo de estilos de mineralización para el desarrollo del modelo (vetillas, cúmulos, diseminado en roca, diseminado en halo y diseminado en matriz) junto con, aproximadamente, 5.100 pruebas de flotación en celdas *rougher* y 2.300 análisis de mineralogía QEMSCAN para el estudio de su impacto en la recuperación. El modelado se realiza con la función de modelado implícito de LeapfrogGeo que usa un método de interpolación derivado de la función de base radial denominado FRBF (*Fast radial basis function*).

Los controles geológicos estudiados indican que la mineralización en vetillas se presenta de manera transgresiva a través de las litologías y alteraciones, exhibe una asociación con las zonas de dominancia pirítica, alteración Sericítica y Argílica, además, es completamente dominante en las zonas periféricas del yacimiento. En contraste, la mineralización diseminada en halo evidencia una fuerte asociación con las zonas de dominancia calcopirítica y la alteración Potásica y Sericita Gris Verde, espacialmente se observa principalmente en las zonas centrales y profundas del yacimiento. La mineralización diseminada en roca está distribuida sin mayores controles específicos a través del yacimiento, aunque presenta una débil asociación con la alteración de Fondo Albítica (turmalina-hematita) y Cuarzo-Sericítica. La mineralización en cúmulos también exhibe un control en estas alteraciones y está confinada casi en su totalidad a un cuerpo porfírico específico, que representa el 98% de su volumen total. La mineralización diseminada en matriz está asociada a cuerpos brechosos y a las alteraciones Potásica y Sericita Gris Verde, encontrándose casi exclusivamente en las partes superficiales y centrales del depósito.

Con respecto al impacto en la recuperación de cobre, se puede apreciar que, a través de todos los estilos de mineralización, una mayor liberación de partículas conducirá a una mayor recuperación en el proceso de flotación, siendo la mineralización diseminada en halo y en cúmulos las que exhiben una mayor y menor recuperación promedio, respectivamente. De igual manera, se puede observar un comportamiento similar de las curvas de liberación-recuperación entre la mineralización en vetillas y diseminado en halo sosteniendo una relación positiva y uniforme, mientras que la mineralización en cúmulos y diseminada en roca exhiben una meseta en el porcentaje de recuperación cuando las partículas con un grado de liberación entre el 80% y 100% superan el 80% del volumen total de la muestra, presentando una tendencia ligeramente descendente en el caso de la mineralización en cúmulos.

Palabras Clave: Modelamiento, Geometalurgia, Ocurrencia, Mineralización, Flotación.

Agradecimientos: Se agradece a la División Andina de CODELCO, en especial al Área de Recursos Geológicos y Área de Geometalurgia y Mineralogía.

Depósitos metálicos en la zona del Seno Almirantazgo, Tierra del Fuego, región de Magallanes

Alejandro Díaz Cárcamo¹, Mauricio Mella B.², David Quiroz P.²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Recursos Minerales, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina Técnica de Puerto Varas, La Paz 471, Puerto Varas, Chile

Los depósitos metálicos en la zona del Seno Almirantazgo se insertan dentro de una franja de orientación noroeste-sureste que se extiende desde el extremo sur del continente y más allá de los 52°S. Esta franja se caracteriza por la presencia de depósitos vetiformes y estratoligados de cobre (oro) y cobre-plomo-zinc (oro-plata), alojados en rocas volcánicas y sedimentarias marinas, asignadas al Paleozoico Superior, Jurásico Medio-Superior (Formación Tobífera) y al Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Formación Yahgan y Complejos Ofiolíticos), asociados a la formación de una cuenca marginal abortada, a lo largo del margen occidental de Gondwana, denominada Cuenca de Rocas Verdes (CRV; Dalziel *et al.*, 1974). Los depósitos señalados han sido interpretados como sulfuros masivos volcanogénicos (SMV; Vivallo *et al.*, 1999 y referencias ahí citadas; Logan *et al.*, 2000; Acevedo *et al.*, 2005; Biel *et al.*, 2010). Sin perjuicio de lo anterior, en la actualidad se postula que parte de los yacimientos de tipo vetiforme, específicamente los ubicados en el sector de Cutter Cove, corresponderían a vetas orogénicas vinculadas al magmatismo del Cretácico Inferior alto, asociado a la inversión de la CRV (Townley, com. verbal).

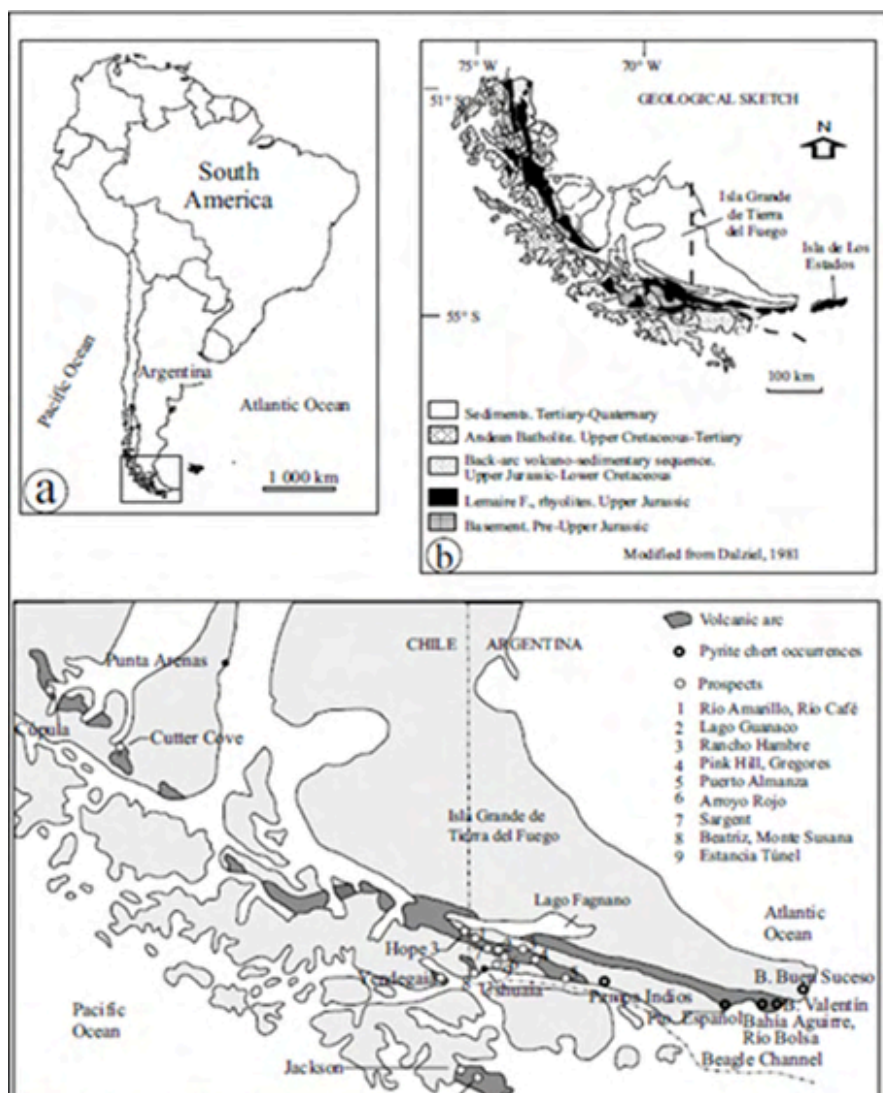


Figura 1. Ubicación depósitos polimetálicos

En el área entre la Cordillera de Darwin y el Seno Almirantazgo la franja antes descrita tiene una orientación general aproximada oeste-este, producto del oroclino de los Andes Fueguinos. A grandes rasgos, en Bahía Blanca (Fiordo Parry) se reconocen afloramientos de rocas del Complejo Metamórfico Cordillera de Darwin (CMCD; Kohn *et al.*, 1995), que incluyen metapelitas, metasamitas, metacherts, asignados al Paleozoico Superior, con ocurrencias de metariolitas asignadas a la Formación Tobífera (Hervé *et al.*, 2010), los que definen una franja de orientación OON-EES en contacto tectónico, hacia el norte, con tobas, tufitas y areniscas asignadas a la Formación Tobífera.

En el Seno Almirantazgo y Lago Cami o Fagnano los depósitos alojados en la Formación Tobífera definen también una franja de orientación similar. En la porción occidental, desde el fiordo Parry hasta Caleta María afloran domos riolíticos, peperitas y sucesiones de fangolitas, areniscas y conglomerados asociados a un ambiente submarino; en el centro de la franja en Caleta María y valle del Río Fontaine afloran tobas riolíticas y dacíticas, tanto en ambiente subacuoso como subaérea, con intercalaciones de areniscas y conglomerados finos; en la parte oriental en el borde sur del Lago Cami o Fagnano ocurren basaltos oceánicos con intercalaciones de chert, metasedimentos, hialoclastitas y peperitas. Finalmente, en la isla tres Mogotes afloran rocas sedimentarias marinas representadas por una sucesión rítmica de areniscas y fangolitas, con ocurrencia menor de areniscas calcáreas con trozos de conchas, de 2 a 4 cm de espesor, con intercalaciones de tufitas y tobas interpretadas como sedimentación en una plataforma somera en parte contemporánea con el volcanismo félsico de la Formación Tobífera. Las rocas enunciadas arriba presentan zonas de 100 a 200 m de altos grados de deformación, con desarrollo de milonitas, asociadas a fallas de corrimientos de orientación noroeste y vergencia noreste. En base a las características antes señaladas de esta porción del territorio se ha optado por ocupar el concepto de Dominio Metalogénico el cual considera la superficie definida por un conjunto de afloramientos de rocas que definen un ambiente geológico, que contiene depósitos metálicos que pueden estar o no genéticamente relacionados. En virtud de esto se han definido tres dominios metalogénicos que se describen a continuación.

Dominio D1, incluye el área en donde aflora una secuencia de rocas del CMCD, en el sector de Bahía Blanca, en el fiordo Parry, la que consiste en una franja de hasta 4 km de ancho, de orientación aproximada oeste-este, en la porción meridional del área de estudio. Hacia el techo de esta secuencia se observan zonas de alteración hidrotermal, muy vistosas, de color negro y amarillo, concordantes con la foliación de las rocas según la orientación S_0 : OE que incluyen la presencia de vetas de cuarzo deformadas frágilmente. La mineralogía de alteración/mineralización en estos horizontes incluye cuarzo-muscovita-clinocloro y watanabeita ($Cu_4(As,Sb)_2S_5$) asociada a las vetillas de cuarzo, además de yeso, natrojarosita ($NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), de origen supérgeno. Asociados a la foliación principal S_0 y hacia la base de la secuencia, se observan diques félsicos decimétricos, deformados, con pirrotina-calcopirita-pirita diseminada y en vetillas con textura de "ojo de pájaro" incipientemente desarrollada en pirrotina y especies subordinadas con níquel y cobalto. Resalta en la base y hacia el norte del CMCD, un nivel de milonitas y ultramilonitas, asociadas a fallas de orientación este-oeste y de vergencia norte desarrolladas en tobas y areniscas de ambiente submarino de la Formación Tobífera, las que subyacen a la secuencia de rocas paleozoicas. En esta zona de milonitas se observan vetillas centimétricas de cuarzo-albita-clinocloro-muscovita(sericita), con braunita-paligorskita y chenevixita ($Cu_2Fe_2(AsO_4)_2(OH)_4$) de origen supérgeno deformadas.

Dominio D2, corresponde a una franja discontinua de orientación OON-EES, de aproximadamente 5 km de ancho y 22 km de extensión. Se destacan dentro de esta franja extensas zonas de vistosa coloración amarilla, las cuales están bien definidas en el sector de Punta Amarilla, en las zonas aledañas a la porción occidental del lago Cami o Fagnano y en el cordón Azopardo. Este rasgo está asociado a la oxidación de sulfuros de hierro y arsénico, donde se distinguen arsenolita (As_2O_3), limonita y jarosita. Presenta mejor continuidad hacia el ON, fuera del área de estudio, mientras que hacia el ES se interrumpe por afloramientos de rocas sedimentarias marinas interpretadas como parte de una serie turbidítica de edad indeterminada, expuesta al oeste de Punta Amarilla, en la ribera sur del seno Almirantazgo, y en la Isla Tres Mogotes, y por afloramientos de ignimbritas de depositación subacuática sin evidencias de alteración/mineralización, de la Formación Tobífera, aguas arriba del río Fontaine. Los afloramientos de este dominio incluyen domos félsicos extrusivos, riolitas e ignimbritas, cuerpos hipabisales dacíticos-riolíticos y en menor medida metabasaltos, hialoclastitas, peperitas, metasedimentos y metachert, de ambiente submarino asignados a la Formación Tobífera. La mineralización que se aloja en los domos riolíticos, se presenta en *stockwork* y vetas de sulfuros masivos que incluyen pirita originada a partir del grupo melnikovita-marcasita?, Vaesita (NiS_2), stannita ($Cu_2(Fe,Zn)SnS_4$), glaucodot ($(Co,Fe)AsS$), esfalerita (ZnS), además de cuarzo y trazas de flogopita. La alteración de la roca huésped consiste en cuarzo, illita y trazas de flogopita. En las riolitas y/o ignimbritas, de la parte alta de Punta Amarilla, los sulfuros se encuentran lixiviados y se distinguen trazas de cuprita y la mineralogía de alteración incluye cuarzo, albita, muscovita (sericita) e illita. La mineralización metálica en metatobas y metasedimentos se encuentra diseminada, en vetillas y en bandas, las que incluyen pirita, argentita, esfalerita, arsenopirita. La mineralogía de alteración está representada por cuarzo, albita, muscovita (sericita), clinocloro, dickita y gismondina. La naturaleza de los sulfuros y de los minerales de alteración asociados, contenidos en los domos riolíticos y en los metasedimentos permite asignarlos a los del tipo SMV. En tanto, la presencia de zeolitas, micas y albita sería representativa de la alteración de piso oceánico y/o del metamorfismo de bajo grado.

Dominio D3, definido en la mitad occidental del islote Mogote principal, está representado por bandas de sulfuros, interestratificados en la base de una secuencia que incluyen pizarras, filitas, metareniscas finas con intercalaciones de tobas/tufitas, interpretadas como parte de una serie turbidítica, la que presenta distintos grados de deformación y alteración hidrotermal. El espesor aparente, de los niveles con mayor concentración de sulfuros en la base de la secuencia, tiene del orden de 10 m y consiste en bandas milimétricas a centimétricas de pirrotina-pirita-esfalerita, intercaladas en metareniscas finas y/o filitas compactas. Se reconocen texturas framboidales en piritas y formas elongadas o deformadas según la foliación dominante S_0 en pirita-pirrotina-esfalerita asociada a manganeladonita. En las zonas de bandas no deformadas o débilmente deformadas, que coinciden con las zonas de mayor desarrollo de bandas con sulfuros, hay presencia de albita y calcita(cuarzo) que se relaciona con procesos de alteración de fondo oceánico y a un evento póstumo vinculado a etapas de deformación, respectivamente. Se puede apreciar la deformación sobrepuesta según la foliación S_1 , a la que se asocian las vetillas de calcita, cuarzo y pirrotina-arsenopirita. Bajando en la secuencia aumenta el grado de deformación hasta desarrollar zonas ultramiloníticas, en donde se puede apreciar el reacomodo de las bandas de sulfuros en las charnelas de pliegues. La parte inferior de esta secuencia se encuentra completamente obliterada y presenta una intensa alteración a albita, clinocloro, muscovita (sericita), cuarzo y diseminación de pirita, pirrotina y calcopirita. En síntesis, para este dominio es posible distinguir tres eventos de alteración/mineralización: un primer evento sinsedimentario, el cual se encuentra mejor representado hacia la base de la serie turbidítica y cuya fuente de sulfuros estaría relacionada con la actividad magmático/hidrotermal que dió origen a la mineralización de sulfuros masivos, en el sector de Punta Amarilla; un segundo evento se relacionaría con la generación de piritas framboidales interpretadas como de origen diagenético, mientras que el evento con calcita y cuarzo subordinado con sulfuros representaría el evento más tardío y sería contemporáneo a las fases compresivas relacionadas a la inversión de la CRV, durante el Cretácico Inferior.

Conclusiones

Durante el Jurásico-Cretácico Inferior el volcanismo predominantemente ácido, consignado en la Formación Tobífera, en parte contemporáneo con los depósitos principalmente turbidíticos, consignados en la Formación Yahgan, señalan las condiciones paleoambientales en donde se generaron los depósitos del tipo SMV, en la zona del seno Almirantazgo.

Procesos posteriores de deformación relacionados a la inversión de la CRV, durante el Cretácico Inferior alto, se ven reflejados en los depósitos contenidos tanto en las rocas volcánicas ácidas como en las rocas metasedimentarias, específicamente en el reequilibrio de las especies sulfuradas y en la deformación dúctil-frágil presente en los sistemas de vetas, mantos y *stockwork* de los cuerpos mineralizados del área de estudio. Los estudios en la zona, aún en desarrollo, permiten suponer un potencial de exploración para este tipo de depósitos. La continuidad de afloramientos del Jurásico Cretácico Inferior que albergan la mineralización, así lo indica. Las principales guías de exploración son litológicas y se refieren a la presencia del volcanismo submarino félsico, a las rocas sedimentarias marinas contemporáneas al volcanismo y a la expresión de extensas y vistosas zonas de alteración/mineralización. Los modelos estructurales que permitan modelar y diferenciar distintos eventos de alteración/mineralización están en desarrollo, así como también la caracterización geoquímica de estos depósitos y la determinación de edades.

Palabras Clave: Sulfuros masivos volcanogénicos, Cuenca de Rocas Verdes, Complejo Metamórfico Cordillera de Darwin.

Referencias:

- Vivallo, W.P.; Zappettini, J.C.M.; Gardeweg, M.C.; Márquez, M.J.; Tassara, A.H.; González, R.A. 1999. Mapa de recursos minerales del área fronteriza argentino-chilena entre los 34 y 56° S. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 1, 1 mapa escala 1.000.000. Santiago.
- Logan, M.A.; Brodtkorb, M. K.; Schalamuk, I.B. 2000. Mineral deposits associated with submarine volcanism of Argentina. In VMS. In Deposits of Latin America, Mineral Deposits Division Geological Association of Canada. p. 543-565.
- Acevedo, R.D.; Fanlo, I.; Subías, I.; Paniagua, A.; Buffone, D.E. 2005. Polymetallic VMS deposits of the Andes Fueguinos (Southernmost Argentina): Preliminary report.
- Biel, C.; Subías, I.; Fanlo, I.; Mateo, E.; Acevedo, R.D. 2010. The Arroyo Rojo volcanic-hosted massive sulfide deposit (Tierra del Fuego southernmost Argentina): geology, mineralogy, petrography and mineral chemistry. In Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.27, núm. 1, 2010, p. 84-96.
- Dalziel, I.W.D.; de Wit, M.J.; Palmer, K.F. 1974. Fossil marginal basin in the southern Andes. Nature 250 (5464): 291-294. doi: 10.1038/250291a0.
- Hervé, F.; Fanning, C.M.; Pankhurst, R.J.; Mpodozis, C.; Klepeis, K.; Calderón, M.; Thomson, S.N. 2010. Detrital zircon SHRIMP U-Pb age study of the Cordillera Darwin Metamorphic Complex of Tierra del Fuego: Sedimentary sources and implications for the evolution of the Pacific margin of Gondwana. Journal of the Geological Society 167 (3). doi: 10.1144/0016-76492009-124.
- Kohn, M.J.; Spear, T.M.; Harrison, T.M.; Dalziel, W.D. 1995. 40Ar/39Ar geochronology and P-T-t paths from the Cordillera Darwin metamorphic complex, Tierra del Fuego, Chile. Journal of Metamorphic Geology 13: 251-270.

Caracterización de pulsos del sistema de vetas epitermales Paciencia, proyecto Pampa Paciencia, norte de Chile

Diego Guido¹, Luciano López¹, Claudio Romo², Matías Galina¹, Sebastián Jovic¹, Gerardo Pérez¹

(1) Instituto de Recursos Minerales (INREMI-UNLP) - CONICET, Argentina

(2) Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile

Pampa Paciencia es un proyecto de exploración de metales preciosos ubicado en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile, a unos 17 km al noroeste de la localidad de Sierra Gorda.

La propiedad pertenece a la compañía de exploración canadiense Astra Exploration, y se encuentra localizada dentro de la Faja Paleocena, en proximidad de la antigua mina vetiforme Faride (Camus y Skewes, 1991).

La mineralización de oro y plata en Pampa Paciencia fue descubierta entre los años 2013 y 2014 por la empresa Arena Minerals a partir del muestreo de escasos afloramientos y fragmentos sueltos de mineralización encontrados sobre la importante cobertura sedimentaria terciaria a moderna que caracteriza a la región, y de donde se desprende el nombre del proyecto. B2Gold realiza trincheras y perfora el proyecto en 2015 confirmando que se trata de un sistema de vetas de cuarzo epitermal de baja sulfuración asignables en edad al Paleoceno, relacionados con mineralizaciones epitermales de la misma edad ubicadas en la Faja Paleocena como el yacimiento El Peñón y la mina Faride (Hopper y Guido, 2021).

Durante los años 2021 a 2023, la empresa Astra explora el área con detalle definiendo que se trata de un sistema de vetas de cuarzo, bandeadas y brechadas, de rumbo principal Oeste-Noroeste a Este-Oeste, alojadas en rocas volcánicas cretácicas de la Formación Quebrada Mala, granitoides cretácicos del Complejo Intrusivo Sierra Gorda o en stocks del Paleoceno. Este sistema de vetas se encuentra en proximidad a la falla Dominador, una falla regional de rumbo Norte-Sur, por donde se interpreta han migrado magmas y mineralizaciones dada su relación de proximidad con las vetas del sistema epitermal Faride.

A partir de un programa de 7.000 metros de perforaciones aire reverso, Astra define el principal sistema de vetas llamado Paciencia. Este conjunto de estructuras se aloja en granitoides del Complejo Intrusivo del Cretácico, tiene una extensión de 1,4 kilómetros, un ancho promedio real de 10 a 15 metros, y está formado por tres segmentos de unos 300 a 500 metros de largo denominados Paciencia Este, Paciencia y Paciencia Oeste. Estos segmentos están separados por fallas de rumbos Este-Noreste a Noreste posiblemente formados por la misma cinemática que originaron las fracturas Noroeste. Dentro de ese sistema de vetas se determinaron tres zonas con concentración de altas leyes de oro y plata, con una relación Ag:Au menor a 50, que se extienden desde la superficie y hasta los 200 a 250 m de profundidad (www.astra-exploration.com).

La presente contribución expone los resultados de un estudio detallado en las vetas epitermales del sistema de vetas Paciencia, realizado a partir del mapeo de pulsos mineralizantes y muestreo de los pozos diamantina perforados por B2Gold en 2015 y los pozos RC perforados por Astra en 2022. A partir de ese muestreo se realizaron 17 secciones delgadas, 16 secciones pulidas, representando los diferentes niveles tanto a lo largo como en profundidad del sistema de vetas (Figura 1).

El relleno del sistema de vetas Paciencia es multiepisódico. Diferentes inyecciones de sílice, carbonatos, sulfuros y sulfosales dan lugar a un grupo de pulsos mineralizantes que se han agrupado en eventos hidrotermales, tectónico-hidrotermales, tectónicos y supergénicos. Todo esto se resume en la siguiente secuencia (Figura 1) de cuatro eventos.

El Evento 1 está formado por dos pulsos: el Pulso QBC está compuesto por un conjunto de vetillas de sílice con texturas bandeadas coloforme y crustiforme y en mosaico que oscilan entre 0,5 y 1 cm de espesor. Estas vetillas se cortan entre sí, formando en ocasiones un stockwork abierto. No se reconocen sulfuros y óxidos en este pulso, y los valores de oro y plata son relativamente bajos. El segundo pulso, BxQ, incluye al menos dos inyecciones tectónico-hidrotermales que forman brechas con cemento sílice formado por cuarzo equigranular de grano fino y cuarzo con textura en peine. Los clastos de la brecha hidrotermal están compuestos de rocas de caja silicificada, cuarzo recristalizado con caolinita y sericita asociada, fragmentos del pulso anterior QBC, y también fragmentos de un brechamiento BxQ anterior.

El Evento 2 está formado también por dos pulsos. El pulso BPA representa la principal etapa de relleno del sistema de vetas estudiado, tanto desde el punto de vista volumétrico como del contenido en metales preciosos. Este pulso incluye una sucesión de al menos 4 inyecciones principales que forman de vetas, brechas o vetillas:

Inyección BPA a: formada por sílice y carbonatos de textura bandeada pero con diferentes tamaños de grano. En las bandas de sílice coloformes de grano fino dominan las texturas de recristalización de sílice amorfa como son las texturas en mosaico, musgosa y flameante, acompañadas de sericita, esmectita y posibles zeolitas de hábito acicular. En las bandas de sílice de grano grueso se observan texturas en peine, crustiformes, en cocarda y plumosas con abundantes inclusiones fluidas, asociada a sericita, illita-esmectita y bandas con adularia levemente alterada a sericita de hábitos tabular a rómbico. Los carbonatos reconocidos son calcita y posiblemente aragonito, y se encuentran formando bandas o rellenando cavidades. Es frecuente encontrar pseudomorfos de calcita (platy calcita) en este evento, y estos reemplazos están frecuentemente asociados a bandas ricas en sulfuros y sulfosales. Los sulfuros dominantes son pirita y marcasita, que se relacionan con otras dos asociaciones de sulfuros y sulfosales: una asociación rica en galena, con galena, calcopirita, tetraedrita y bornita, y posteriormente otra asociación rica en esfalerita, con esfalerita son inclusiones de calcopirita que reemplazan a la asociación de galena. Es importante señalar que en la zona oxidada de estas bandas ricas en sulfuros es el único lugar donde se han encontrado granos de oro nativo con 25 a 50 micrones de diámetro.

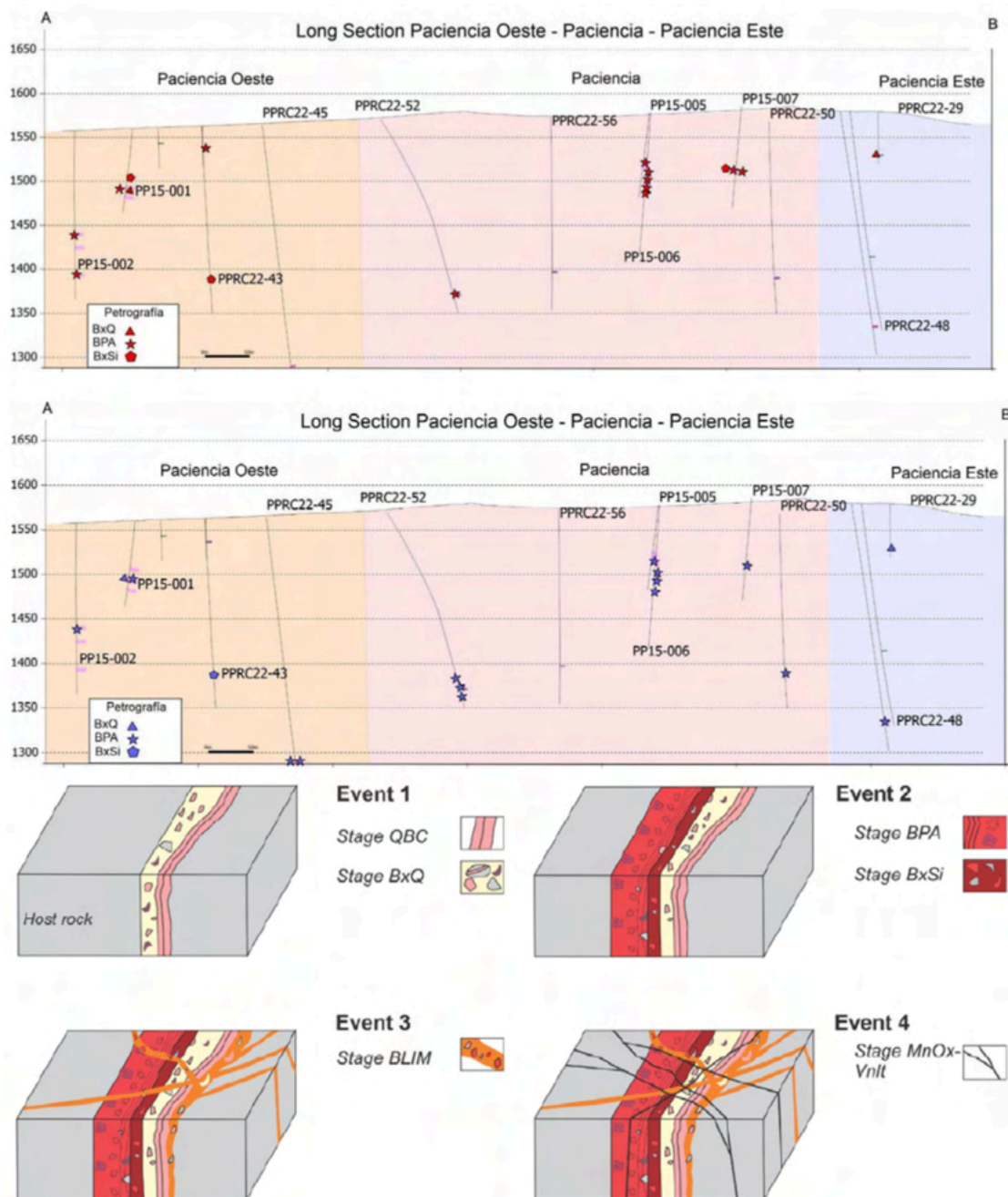


Figura 1. Secciones longitudinales del sistema de vetas Paciencia donde se representan las intersecciones de los pozos muestreados y de las muestras analizadas por luz transmitida (arriba) y luz reflejada (abajo). Debajo se muestra un modelo paragenético de relleno de las vetas del sistema Paciencia.

Inyección BPA b: formada por cristales de amatista de hasta 1 cm de diámetro, comúnmente rellenando cavidades, y asociado a cristales de pirita.

Inyección BPA c: formada por vetillas de cuarzo blanco de pocos milímetros de espesor.

Inyección BPA d: formado por brechas con cemento de calcedonia.

El segundo pulso del Evento 2 es denominado BxSi y está representado por una reactivación tectónica-hidrotermal del sistema de relleno de la veta, compuesto por brechas molidas con clastos angulosos del pulso BPA y de las rocas de caja. El cemento de la brecha es cuarzo con textura en mosaico de grano fino, y se observan cristales dispersos de pirita y marcasita.

El Evento 3 se caracteriza por un pulso denominado BLIM que significa brecha de limonitas, y que representa una brecha predominantemente tectónica y post-mineral cuya matriz es rica en óxidos e hidróxidos de hierro y los clastos pueden ser tanto de relleno hidrotermal de vetas de los eventos 1 y 2, como de rocas de caja.

El Evento 4 es denominado OxMn, y es el evento final. Consiste en la removilización supergénica predominantemente rica en óxidos de manganeso y hierro, con yeso asociado que rellena vetillas y cavidades dentro de las vetas. Asociado a estas vetillas de óxidos de hierro y manganeso, se observa la oxidación de muchos de los sulfuros y sulfosales descritos en el Evento 2.

Este estudio detallado demuestra que los primeros dos eventos formadores del sistema de vetas Paciencia son eventos cíclicos de relleno y brechamiento. El principal evento de mineralización de oro y plata para el sistema de vetas es el pulso BPA, un pulso bandeado de cuarzo y carbonato donde se reconocieron bandas ricas en sulfuros de metales base, sulfosales y oro nativo (bandas tipo ginguro). Los eventos 3 y 4 representan etapas posteriores a la mineralización, de edad indeterminada, y que han removilizado y diluido a los metales incorporados en los eventos hidrotermales iniciales.

Las leyes más altas de oro fueron registradas en estrecha asociación con el pulso BPA; sin embargo, no se descarta la contribución de oro en los eventos BxQ y BxSi, ya que en su cemento se encuentran cristales de pirita. Además, tanto el pulso BxSi como el evento BLIM pueden contener metales preciosos dentro de los clastos del pulso BPA incorporados a la brecha. La presencia de oro asociado con bandas de sílice coloforme y texturas de reemplazo de carbonato (platy calcita) puede ser indicativo de que la ebullición ha sido uno de los principales mecanismos responsables de la precipitación de metales preciosos a partir de los fluidos hidrotermales que dieron lugar al sistema de vetas.

La presencia de granos de oro libre encontrados solamente dentro de las partes oxidadas del sistema de vetas estudiadas sugiere que este metal está probablemente asociado con los cristales de pirita en las zonas primarias del depósito.

Las asociaciones de sulfuros ricas en galena y ricas en esfalerita, junto con abundante cantidad de cristales de pirita están ampliamente distribuidos a lo largo de diferentes partes del sistema de vetas, tanto en profundidad como a lo largo del rumbo. Sin embargo, la presencia de marcasita se restringe principalmente a las porciones profundas del sistema de vetas (por debajo de los 1.450 m.s.n.m.) y por lo tanto esta fase mineral puede ser interpretado como un indicador potencial de las zonas más profundas de la mineralización en Pampa Paciencia.

En la mayoría de las muestras analizadas, pero especialmente en el caso de muestras con abundante proporción del pulso BPA, se observaron abundantes cantidades de bandas ricas en pirolusita y melanos, pudiendo esto corresponder a reemplazos supergénicos de minerales primarios ricos en manganeso como mangano-calcita, rodocrosita u otros minerales de ganga o mena que contengan manganeso. Esto permite vincular las vetas del sistema Paciencia a las vetas de la mina Faride donde hay menciones de minerales ricos en Manganeseo, siendo potencialmente de emplazamiento más profundo dada la mayor cantidad de plata y metales base (Camus y Skewes, 1991) en comparación con Pampa Paciencia.

Palabras Clave: baja sulfuración, Paleoceno, Sierra Gorda.

Referencias:

- Camus, F. y Skewes, M.A., (1991). The Faride Epithermal Silver-Gold Deposit, Antofagasta Region, Chile: Economic Geology, vol. 86, pp 1222-1237.
- Hopper, D. y Guido, D., (2021). NI 43-101 Technical Report Pampa Paciencia project, Antofagasta, Chile. 56 páginas.

Entrega de información geológica a Sernageomin: a 7 años de la aplicación del Reglamento 104

Guillermo López Aguilera¹, Ximena Piñana Montes¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Unidad de Recursos Minerales, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

Desde la entrada en vigor del Reglamento 104, el cual regula la entrega de información de carácter general obtenida de los trabajos de exploración geológica básica, Sernageomin ha recibido cerca de 1.000 proyectos distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional, proporcionando información relevante sobre las actividades de exploración realizadas en nuestro país.

La información está disponible para libre consulta por parte de la comunidad, donde podrán extraer información geológica generada durante las campañas de exploración, tales como muestras de superficie, sondeos, mapas geológicos, levantamientos geofísicos y geoquímicos, estudios mineralógicos e imágenes satelitales, entre otros antecedentes. Ésta se encuentra disponible mediante el renovado VISOR SIGEX, el cual corresponde a un visor dinámico tipo *dashboard* el cual facilita la navegación del usuario en la búsqueda y gestión de las iniciativas de exploración. Además, permite la descarga directa de los archivos, como así también la interacción con otras capas de información, como franjas metalogénicas, que permiten contextualizar los proyectos en el ámbito geológico nacional.

El presente trabajo muestra el estado del arte en los 7 años de aplicación del Reglamento 104, donde existe un claro predominio de actividades de exploración en la zona norte de Chile (entre las regiones de Arica y Parinacota y de Coquimbo), área en la cual se concentra más del 80% de las iniciativas, lo que equivale a 810 proyectos, donde destaca la región de Antofagasta con 327 proyectos. En cuanto al tipo de recurso, el cobre es el elemento con mayor interés por parte de las compañías, con 85% de las iniciativas, seguido por los proyectos de oro y plata con 7%. Otros recursos como Rocas y Minerales Industriales, cobalto, litio, hierro e hidrocarburos, abarcan el 8%, donde este último recurso es explorado exclusivamente en la región de Magallanes.

Se han puesto a disposición del público 873 proyectos, lo que representa el 88% del total, donde 647 proyectos han presentado mapas geológicos, 300 sobre campañas de sondeos y 389 con información de muestras de superficie, entre otros antecedentes geológicos indicados en el Reglamento 104. Además, se indican las próximas etapas de desarrollo del VISOR SIGEX y los posibles cambios al Reglamento sobre la base de la Ley 21.420 y su propuesta de modificación.

Con este Reglamento se espera incrementar el conocimiento geológico y de la actividad exploratoria en el territorio nacional, disminuir el costo de las labores de exploración básica y evitar la pérdida de información de proyectos abandonados, como así también el desarrollo de oportunidades de negocios entre los diferentes actores. Por lo anterior, esta herramienta aporta positivamente a la industria minera en sus etapas tempranas de desarrollo, como lo es la exploración geológica básica o *greenfield*, ya que una de las brechas que existe en nuestro país relacionada a potenciar la exploración por recursos minerales es el acceso a la información geocientífica.

Palabras Clave: SIGEX, exploración, minería, Sernageomin.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Influencia de los mecanismos de mineralización en la estimación geoestadística de recursos en placeres de oro fluviales, Tierra del Fuego, Andes Australes (54°S)

Juan de Dios Serra¹, **Carlos Marquardt¹**, José Joaquín Jara¹, Julián Ortiz², Tomás Roquer¹, Felipe Del Valle¹, Eduardo Córdova¹, Nicolás De Pablo¹

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería, Facultad de Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Queen's University, Robert M. Buchan Department of Mining, Faculty of Engineering and Applied Science, Goodwin Hall, Room 354, 25 Union Street, Kingston, Canada

A lo largo de Chile existen varios distritos mineros donde se han explotado placeres o lavaderos de oro. Debido a que la explotación de este tipo de yacimientos ha estado asociada a la pequeña y mediana minería, su caracterización geológica y la estimación de sus recursos es limitada. Este problema se profundiza debido a la naturaleza discontinua y errática de la mineralización en este tipo de yacimientos, por lo que se recurre a utilizar métodos de interpolación de leyes tradicionales, basados en geometría y relaciones matemáticas simples. Este trabajo busca entender cómo los mecanismos de mineralización influyen en el proceso de estimación de recursos.

Para los lavaderos de oro ubicados en el Distrito Minero Cordón Baquedano, Tierra del Fuego, se ha propuesto un modelo geológico que sugiere la presencia de un manto mineralizado continuo y homogéneo. En este trabajo se ha estudiado uno de estos yacimientos mediante la realización de pozos de muestreo que tienen un diseño que considera el modelo geológico sugerido, utilizando una malla gruesa recomendada de 200x200 m. A modo de validación de los resultados, se realiza un mapeo geológico de detalle (1:2.500), una malla de pozos de verificación de 140x140 m y se utilizan datos de pozos históricos. Las muestras obtenidas son analizadas para la determinación de leyes de oro y para la estimación de recursos. Para esto último, se utilizan técnicas de interpolación basadas en la teoría de variables regionalizadas, las cuales han sido aplicadas a placeres de oro en otras partes del mundo en casos particulares.

Los resultados preliminares indican una ley media del yacimiento de 110 a 120 mg/m³ de Au. Las mejores leyes están ubicadas a lo largo del canal activo del yacimiento. El efecto pepita estimado del 40%±10% de la varianza de los datos. El manto mineralizado no es continuo y tiene una potencia promedio de 2 m. Estos mantos están ubicados por debajo de una capa vegetal y por encima de una circa (roca estéril), alcanzando una profundidad máxima mayor a 5 m. En cuanto a la variografía, en la dirección paralela al canal actual (N-S) existe una correlación espacial aparente con un alcance de 600 m; y en la dirección perpendicular (E-O), el variograma varía de manera sinusoidal con una ciclicidad de entre 100 y 200 m. Interpretamos estos resultados como indicadores de que los cuerpos mineralizados corresponden a paleocanales paralelos al canal actual y con meandros de baja a moderada sinuosidad.

Palabras Clave: Geoestadística, Placeres, Oro, Magallanes.

Grassroot and Brownfield exploration using Mini-Stage

Daniel Moncada¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

The search for mineral deposits is high risk, time consuming and expensive. Any technique or technology that can help the explorationist to inexpensively and quickly discriminate between areas with high potential for economic mineralization and those with lower potential provides a competitive advantage to those applying the technology. This study describes a tool that may be applied in exploration for Au-rich veins that have been the source of many of the great placer districts worldwide. They display evidence of fluids at supra lithostatic pressures that form fluid inclusions that can be easily identified by thin-section petrography or any equivalent microscopy technique. However, there are more time-efficient methods for field based exploration such as the fluid-inclusion crushing-stage which is able to qualitatively verify the presence of high-pressure CO₂ and other volatiles in fluid inclusions (Deicha, 1950; Roedder, 1970; Diamond and Marshall, 1990). Recognizing the need to have a fast field-based analysis, in this study we are developing and building a portable fluid-inclusion crushing stage using a 3D printer. The crushing stage will be used to study the fluid inclusions in different host minerals (e.g. quartz, feldspar) in the exploration for Au-rich vein deposits in Chile, especially in areas of little or non-existent outcrop. In collaboration with AGS Cabo de Hornos (research vessel of the Chilean Navy), more than 65 seafloor sediment samples were collected from the seafloor using a box core sampler and coastal samples for Grassroot exploration. We use the Mini-Stage new technological tool designed and manufactured by the University of Chile. The Mini-Stage is a field tool that has been used in order to verify the presence of CO₂ in fragments of quartz and thus be able to have quick indicators of sectors with possible gold mineralization in marine fjords and channels. Another area that has been used is the project Joy located in Maule, Chil, where the work was focused on Brownfield exploration looking for veins with small outcrops to look for evidence of mineralization in the area. The results show areas with high potential of mineralization and evidence of CO₂ in the veins.

Keywords: crushing stage, Grassroot and Brownfield exploration, gold, PTX properties.

Financing: SHOA ORD. 4187/22/63 and CIMAR25, (Fondecyt) Iniciacion 11170210 projects by D. Moncada CIMAR 25 (CONA/SOA) to Gregory De Pascale.

References:

- Diamond, L.W. and Marshall, D.D., 1990. Evaluation of the fluid-inclusion crushing-stage as an aid in exploration for mesothermal gold-quartz deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 38(3): 285-297.
- Deicha, G. (1950). Essais par écrasement de fragments minéraux pour la mise en évidence d'inclusions de gaz sous pression. *Bull. Soc. fr. de Minér.* 73. 439-445.
- Roedder, E. (1970). Application of an improved crushing microscope stage to studies of the gases in fluid inclusions. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 50(1). 41-58.

Exploration on active and fossil hydrothermal system in Chile: Using properties of fluids

Daniel Moncada¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Exploration geologists have been developing systematic approaches to search for mineral deposits for centuries, starting with the works of Georg Bauer (Georgius Agricola), who published *De Re Metallica* in 1556. Applying modern technology provides a competitive advantage in the search for mineral deposits because an explorationist can quickly evaluate potential targets and eliminate areas without good potential for mineralization. Fluid inclusions at room temperature phase relations can be used as a proxy for the PTX properties of fluids that are associated with geothermal, epithermal precious and base metal, polymetallic, and porphyry copper deposits. Here we describe the used fluids properties from *Grassroot and Brownfield* exploration in some deposits in Chile. The geothermal systems, Irruputuncu and Olca located between Calama and Iquique (Northern part of Chile) at more than 4,000 meters above sea level. Samples of these geothermal systems were examined using a petrographic microscope, and fluid inclusion and mineralogical evidence for boiling of the hydrothermal fluids was recorded. Located in the same area the Collahuasi Mining District hosts the Rosario porphyry copper-molybdenum deposit. Evidence of fluid inclusions assemblages (FIAs) in quartz and were classified at room temperature: (1) Halite-bearing inclusions indicating high salinity fluids; (2) Chalcopyrite daughter mineral; (3) Liquid-rich aqueous inclusions with trapped solid; (4) Coexisting halite bearing and vapor-rich inclusions with a broad range in liquid-to-vapor ratios indicating fluid-phase separation; (5) Coexisting liquid-rich and vapor-rich inclusions with a broad range in liquid-to-vapor ratios indicating fluid-phase separation; (6) Vapor-rich inclusions indicating flashing of the fluid. These observations were incorporated into a geographical information platform to define the three-dimensional relationship between the fluid inclusion characteristics, type of alteration, rock and mineralization. These results may be used to predict ore grades based on petrographic observations of fluid inclusion and mineral textures and provide a relatively simple and rapid tool for evaluating veins along unexplored portions of the Rosario and Rosario West to locate the blind intrusion. Situated within the Coastal Range of Central Chile the epithermal precious metal deposit Chancón shows evidence of (1) coexisting liquid-rich and vapor-rich inclusions with a broad range in liquid-to-vapor ratios indicating fluid-phase separation; (2) Vapor-rich inclusions indicating flashing of the fluid. The result suggests that additional precious metal mineralization may be present beneath the deepest levels that have been explored. The polymetallic Alhué mining district shows petrographic evidence of FIAs in all the veins that have close correlation between boiling/flashing and economic metal for exploration. The difference in electrolytes and Th observed shows the contribution of different types of fluids where some of them are related to deeper mesothermal conditions overprinted by an epithermal environment. The Chilean Patagonia hosts numerous polymetallic and epithermal environment resources, among these the Cerro Bayo District in the Aysén Region. A detailed fluid inclusion petrography, gangue mineral textural characterization and mineralization paragenesis study was conducted on the ore bearing Fabiola and Dagny vein. Areas of most intense boiling are associated with colloform and bladed calcite textures. These results may be used to predict ore grades based on fluid inclusion and mineral textures and provide a relatively simple and rapid tool for evaluating veins along unexplored portions of the Cerro Bayo District. Finally, in collaboration with AGS Cabo de Hornos (research vessel of the Chilean Navy), more than 65 seafloor sediment samples were collected from the seafloor using a box core sampler and coastal samples. We use the Mini-Stage, a new technological tool designed and manufactured by the University of Chile. The Mini-Stage is a field tool that has been used in other areas, in order to verify the presence of CO₂ in quartz veins and thus be able to have quick indicators of sectors with possible gold mineralization in marine fjords and channels.

Keywords: CO₂, Grassroot and Brownfield exploration, gold, PTX properties.

Financing: SHOA ORD. 4187/22/63 and CIMAR25, (Fondecyt) Iniciación 11170210 projects by D. Moncada.

El origen del oro de Villarrica: una propuesta acerca de la fuente de mineralización primaria aurífera en Voipire, región de la Araucanía, Chile

Gonzalo Montoya¹, José Piquer¹, Eduardo Salazar²

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile
(2) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Facultades de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Santiago, Chile

Históricamente la ciudad de Villarrica, ubicada en la Región de la Araucanía, Chile, ha sido vinculada a la presencia de yacimientos auríferos del tipo placer, en los ríos que la circundan, sin embargo, el conocimiento sobre estos depósitos, la procedencia del oro y en general información actualizada de estos es casi inexistente.

Una de las principales problemáticas de estos depósitos históricos es la relación entre el origen del oro y alguna litología en particular, por lo que se desarrollaron sucesivas campañas de terreno en búsqueda de evidencias de procesos que podrían haber favorecido la precipitación de oro a niveles suficientes como para concentrarse con posterioridad en los placeres que son conocidos. Para esto, se analizó la morfología de las partículas de oro, a modo de establecer si el grado de transporte es consistente con un origen local; se realizó un mapeo geológico del área y una descripción petrográfica y petrológica de las rocas existentes, con énfasis particular en las evidencias asociadas a alteración y mineralización aurífera. Finalmente se realizaron análisis químicos de las rocas con mayor posibilidad de contener mineralización con una suite de elementos mayores y menores y ensayo a fuego para obtener la concentración de oro presente.

Las exploraciones en la zona mostraron que en el cerro Voipire afloran principalmente cuerpos serpentiniticos, asociados a un paleoprisma de acreción. Sin embargo, se realizó además el descubrimiento de cuerpos intrusivos fuertemente alterados, denominados Intrusivos Boquipulli, los cuales corresponden a granitoides, con fuerte alteración a sericita-moscovita, y un intenso vetilleo de cuarzo de alta temperatura de hábito euhedral. Adicionalmente, la observación de las partículas de oro, muestra ciertas características que sugieren un bajo grado de transporte, y, por lo tanto, podría decirse que el origen de la mineralización primaria estaría circunscrito a las rocas que afloran en el cerro Voipire.

El indicador más claro que vincula a los cuerpos intrusivos con la mineralización de oro, es la consistente anomalía química de oro que presentan ambos cuerpos, con valores máximos de 0,49 ppm y 0,39 ppm promedio en 6 análisis realizados con ensayo a fuego. Estos valores exceden, por varios órdenes de magnitud la concentración normal de la corteza y de intrusivos similares, y son similares a las leyes de Au en distintos tipos de yacimientos. En muestras de serpentinita, por su parte, el Au estaba bajo el límite de detección.

Por lo tanto, se propone que la mineralización primaria en la zona corresponde a sistemas de oro relacionados a intrusivos (yacimientos tipo IRGS, por su sigla en inglés), que daría origen al oro de la zona, consistente, por un lado, con la relación espacial determinada por la morfología de las partículas observadas, y por otro, al tipo de alteración y vetilleo presente en las rocas encontradas que cuentan con esta anomalía.

Finalmente, se propone que el oro, al menos del sector de Voipire, cercano a la ciudad de Villarrica, habría precipitado a partir de fluidos hidrotermales relacionados al emplazamiento de cuerpos intrusivos, y que por procesos de erosión y transporte de los ríos Huisca y Pichiluma, se habrían formado los placeres que, entre otros, serían la fuente del oro de Villarrica.

Palabras Clave: Oro, Alteración Hidrotermal, Yacimientos Minerales, Exploración, IRGS.

Financiamiento: Esta investigación fue parcialmente financiada con fondos de la Escuela de Geología y el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad Austral de Chile.

Los distritos mineros de Cu y Au (Ag) del norte y centro de Chile (18°-35°S): su distribución e implicancias tectónicas y metalogénicas

Rodrigo Morel Guzman¹

(1) Consultor Independiente

Resumen

En la región de Atacama se reconoce comparativamente una mayor densidad superficial de distritos mineros de Cu y Au, así como un desarrollo transversal más continuo del magmatismo y de las franjas metalogénicas desde el Jurásico Medio hasta el Plioceno Inferior. Esto se atribuye en parte a la mayor cercanía de los dos sistemas de fallas, Atacama y Domeyko, así como a una mayor densidad del arreglo estructural, especialmente entre ambas megaestructuras. En contraste, en los sectores central y sur de la Región de Coquimbo, el acuífamiento entre las franjas metalogénicas del Cretácico Superior y del Mioceno Superior es consistente con (i) la extinción de ambas megaestructuras y con (ii) la tectónica de mayor acortamiento asociada con la subducción plana subyacente a partir del Mioceno Medio.

Introducción

En las últimas décadas muchas compañías mineras *senior* que operan en Chile han enfocado la prospección en los distritos mineros que contienen sus operaciones, explorando depósitos conocidos y/o sus ocurrencias satelitales. Este estudio apunta a incrementar el conocimiento geológico y cartográfico de: (i) los distritos mineros de Cu y Au y los eventos y procesos de mineralización relacionados con su origen y (ii) las franjas metalogénicas que los albergan. Las bases para este trabajo son: (i) un catastro y clasificación de aproximadamente 3,000 depósitos de Cu y metales preciosos, (ii) la interpretación y delimitación de los distritos mineros (escala 1:1.500.000) y (iii) un análisis geocronológico de los eventos de mineralización y alteración hidrotermal para los aproximadamente 460 distritos de cobre y 160 distritos de metales preciosos reconocidos. En la delimitación y denominación de los distritos se han mantenido los criterios y nombres existentes en la literatura geológica nacional - mayormente publicaciones del Sernageomin - excepto en los casos que debieron agruparse por efecto de la escala empleada. La base estructural (Figs.1 y 2b) corresponde a una versión modificada del mapa geológico escala 1:1.000.000 del Sernageomin.

Marco geodinámico y metalogénico

Los segmentos Central y Sur de Los Andes ocurren sobre el borde oeste de la placa Sudamericana, principalmente sobre antigua corteza ensiálica sometida a un régimen de acortamiento tectónico asociado con la subducción de la placa de Nazca (NZP) desde mediados del Terciario hasta el presente [1]. La información sísmica indica que la NZP se subducta con una inclinación de ~20-30° excepto dos regiones de subducción plana (FSR) ubicadas al norte de las dorsales de Nazca y de Juan Fernandez (JFR) donde presenta inclinaciones subhorizontales entre 100 y 150 km de profundidad (Fig.1). Entre 18° - 33°S se reconocen: (i) dos zonas de falla mayores paralelas al orógeno (Atacama ZFA y Domeyko ZFD) y varias otras subparalelas de segundo orden, (ii) lineamientos y fallas de segundo orden de dirección noroeste a noreste y (iii) franjas metalogénicas submeridianas de Cu y Au desarrolladas en general de oeste a este entre el Jurásico Medio y el Plioceno Inferior (Fig.2b). Dos de las franjas más ricas en Cu y Mo ocurren asociadas con ambas megaestructuras: Jurásico Superior a Cretácico Inferior (ZFA) y Eoceno Medio-Oligoceno Inferior (ZFD). La tectónica post-Triásico y pre-Oligoceno Superior ha sido asociada con: un margen de subducción, una convergencia a tasas variables con un ángulo oblicuo al orógeno y una deformación cortical de tipo extensional a transtensional-transpresional [2, 3, entre varios otros autores]. Desde el Oligoceno Superior (~25 - 22 Ma) y hasta el presente se instala un régimen de subducción ortogonal al orógeno asociado con la recién creada NZP [3]. La JFR se desplaza desde los ~18°S hacia el sur hasta su actual posición (~33°S) [4] y el arco magmático migra hacia el este, ambos movimientos condicionados por el incremento al doble o triple de las tasas de convergencia al inicio de esta época [5]. A partir de ~15 - 10 Ma la posición de la JFR se mantiene invariable [6] generando las condiciones para (i) la formación de una FSR entre ~27°- 33°S, (ii) una tectónica compresiva de plegamiento del retroarco y (iii) un alzamiento mayor de la cadena andina [1]. En el flanco oeste del orógeno la dinámica de la metalogénesis y el emplazamiento de los depósitos mayores a partir del Oligoceno Superior es consistente con la migración al sur de la JFR, desarrollándose secuencialmente y de norte a sur: la franja de Au-Ag (Cu) de Maricunga (25-12 Ma), el distrito de Cu-Mo (Au) de Caserones (19-17 Ma), el distrito de Au-Cu de El Encierro-Valeriano (10-8 Ma), el distrito de Au-Ag (Cu) de El Indio (13-8 Ma) y el distrito Cu-Mo de Los Pelambres-El Pachón (13-8 Ma) (Fig.2a). Esta dinámica continúa incluso al sur de la FSR y de la JFR llegando hasta el Plioceno Inferior en los distritos de Cu-Mo de Río Blanco-Los Bronces (9-4 Ma) y El Teniente (9-4 Ma), transgrediendo en cierta forma el límite entre los segmentos Central y Sur del orógeno correspondiente al quiebre mayor en el ángulo de subducción de la NZP en la región.

Distribución y características de los depósitos y distritos de Cu y Au

Cobre. La asociación más frecuente en los distritos de Cu - sin contar los depósitos vetiformes - corresponde a los tipos Fe-Cu-Au y Estratoligado Cu (Ag) revelando cierta proximidad en las fuentes de los fluidos hidrotermales y ambientes depositacionales, a pesar que (i) los Fe-Cu-Au ocupan sistemáticamente posiciones más proximales respecto de los ejes de los arcos magmáticos coalescentes y que (ii) los estratoligados se hallan controlados por cuerpos ígneos más someros, comúnmente subvolcánicos félsicos a máficos los cuales incluyen también cuerpos de ocoitas de composiciones intermedias. Con menor frecuencia varios estratoligados han sido asociados con la ocurrencia de pirobitumen pre o singenético respecto de la mineralización, el cual presumiblemente actuó como uno de los agentes reductores en la precipitación de los sulfuros de cobre. En la Región de Atacama los depósitos Fe-Cu-Au caracterizan distritos como Teresa de Colmo-Cerro Negro, El Salado, Mantoverde y Candelaria-Punta del Cobre, todos éstos en las franjas del Cretácico Inferior y Superior.

El catastro al este de Punta del Cobre sin embargo, entre las zonas de falla Paipote y Domeyko, muestra una franja N-NE de ~100 km de largo que incluye distritos que contienen vetas Fe-Cu-Au como Garín Nuevo-Garín Viejo, Hornitos Sur, Pampa Larga y Cinchado-Las Cañas-Llano del Tirado (Fig.2b). En estos distritos coexisten vetas Fe-Cu-Au, estratiformes Cu (Ag), vetas de Cu, Ag y polimetálicas así como brechas de Cu (Ag) [7]: las vetas de Fe-Cu-Au se asocian con una alteración a especularita-calcita característica de zonas intermedias a altas en un esquema de zonación vertical para este tipo de depósito, las cuales contrastan con zonas con magnetita de mayor profundidad aparentemente no expuestas. Escasos datos radiométricos sobre muestras de rocas ígneas de caja indican un rango máximo de edades de 86-68 Ma (Cretácico Superior) para la mineralización en estos distritos [8], sin embargo, es probable que este rango se extienda al Paleoceno considerando las edades de otros eventos intrusivos asociados con la mineralización.

Los Pórfidos de Cu-Mo y Cu-Au catastrados en la región de este estudio suman 125 casos y sus asociaciones más frecuentes en los distritos son depósitos epitermales (Au-Ag) de alta a baja sulfidización (AS a BS), sistemas de brechas con o sin turmalina y vetas de Ag, Au o Cu-Au indiferenciadas. En la prolifera franja del Eoceno Medio-Oligoceno Inferior su emplazamiento es (i) a través de cuerpos intrusivos discretos comúnmente agrupados, (ii) sobre centros magmáticos longevos pre-Eocenos, (iii) cercano o sobre rocas de basamento paleozoicas y (iv) bajo dominios estructurales contrastantes superpuestos, comúnmente estructuras de rumbo o inversas de bajo a alto ángulo, reutilizadas para generar juegos extensionales [9, entre muchos otros autores].

Metales preciosos. El set de pórfidos de Au (Cu, Mo) alcanza una docena de casos, la mayoría en la franja Maricunga: a escala distrital se asocian más frecuentemente con epitermales de AS y pórfidos de Cu-Au y Cu-Mo. De un total aproximado de 160 distritos de Au (Ag) identificados, un 61% corresponde a subconjuntos de distritos de Cu de mayor tamaño comparativo.

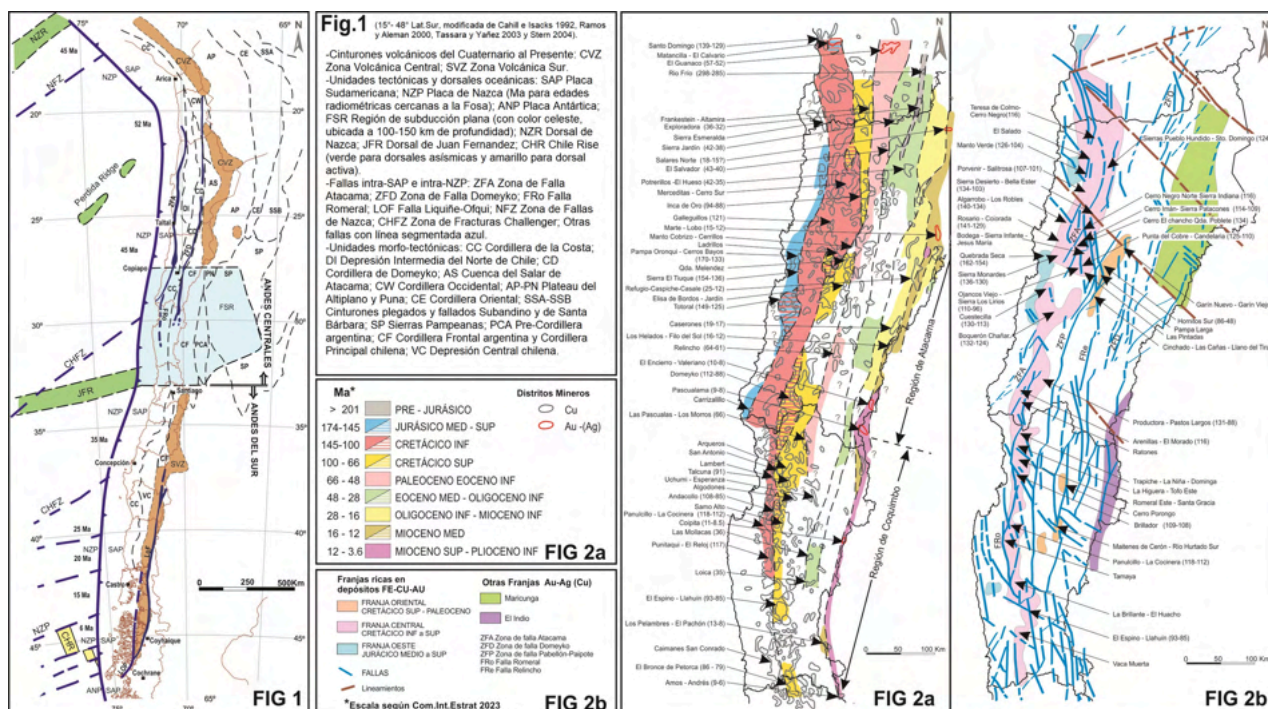


Figura.1 Segmentación de la cadena andina y unidades tectónicas y morfotectónicas. **Figura 2. a.** Distritos mineros y franjas metalogénicas en las regiones de Atacama y Coquimbo; **b.** Estructuras y franjas ricas en depósitos Fe-Cu-Au y metales preciosos en las regiones de Atacama y Coquimbo.

Discusión y Conclusiones

La distribución y geometría superficial de los distritos de Cu y Au (Ag) está principalmente relacionada con estructuras de primer o segundo orden y con los cinturones magmáticos coalescentes. En determinados distritos se identifica un fenómeno de superposición de franjas metalogénicas sucesivas en el tiempo, excepto casos con un hiatus mayor como la superposición de algunos pórfidos del Eoceno Medio-Oligoceno Inferior sobre mineralizaciones pre-jurásicas (Fig.2a). Este fenómeno ha sido asociado con fuentes magmáticas similares [9] o con estructuras corticales con actividad recurrente [2]. La relación de dependencia (~61%) entre los distritos de Au (Ag) y los de Cu de mayor tamaño comparativo se atribuye a fuentes y conductos similares de los fluidos magmático-hidrotermales o al fenómeno de superposición (*telescoping*) de eventos de mineralización de Cu y Au (Ag) por alzamiento y exhumación durante su desarrollo.

En los sectores norte y central de la Región de Atacama resaltan dos características metalogénicas de escala regional: (i) el paralelismo y calce latitudinal entre la franja más ancha y prolifera en depósitos de Fe-Cu-Au del Cretácico Inferior a Superior y la franja miocena de Maricunga (Au-Ag-Cu) (Fig.2b) los cuales revelan una recurrencia metalogénica en Cu y metales preciosos transversal al orógeno y, (ii) una zonación transversal comparativamente más continua de las franjas metalogénicas del Jurásico Medio al Plioceno Inferior (Fig.2a) que se asocia con (a) una mayor densidad superficial de los distritos mineros, (b) una mayor cercanía entre la ZFA y la ZFD y (c) una mayor densidad del arreglo estructural, especialmente entre ambas megaestructuras (Fig.2b).

Esta zonación incluye una tercera franja de depósitos Cu-Fe-Au identificada al este del distrito Punta del Cobre-Candelaria atribuida tentativamente al Cretácico Superior-Paleoceno(?). En contraste con Atacama y en los sectores centro y sur de la Región de Coquimbo, las franjas del Cretácico Superior hasta el Mioceno Superior sufren un acuífamiento tectónico transversal estimado entre 55 y 65 km de acuerdo con la posición de sus límites (Fig.2a). Este acuífamiento es consistente con: (i) la tectónica compresiva de plegamiento y fallamiento inverso post-Oligoceno Superior descrita para el retro-arco, (ii) la extinción de ambas megafallas en esta región y (iii) la dinámica de la FSR subyacente.

Palabras Clave: Distritos mineros, Franjas metalogénicas, Región de subducción plana

Referencias:

- [1] Mpodozis C. y Ramos V.A. (1990). The Andes of Chile and Argentina. En: Geol.of the Andes & its relation to Hydroc.& Min. Res. Eds.: Ericksen, G.E., M.T.Cañas Pinochet y J.A. Reinemud. Circum.Council for Energy & Min.Res., Earth Sc.Series 11: 59-90.
- [2] Zentilli M., MaksaeV V., Boric R. y Wilson J. (2018). Spatial coincidence and similar geochemistry of Late Triassic and Eocene-Oligocene magmatism in the Andes of northern Chile: evidence from the MMH porphyry type Cu-Mo deposit, Chuquicamata District. Int.Jour.of Earth Scs.107:1097-1126.
- [3] Pilger R.H. (1984). Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: Southam. Andes. Jour.Geol. Soc., v.141, 793-802.
- [4] Yáñez G., Ranero C.R., von Huene R. y Díaz J. (2001). Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernandez Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. Jour.Geoph.Res. 106(B4): 6325-6345.
- [5] Pardo-Casas F. y Molnar P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. Tectonics, Vol.6, Issue 3, 233-248.
- [6] Yáñez G., Cembrano J., Pardo M., Ranero C. y Selles D. (2002). The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: geodynamic evidence and implications. Jour.Southam. Earth Scs., Vol.15, Issue 1, 23-38.
- [7] Inf.inéditos ENAMI: (a) CGA (2009). Estudio geológico distrital, Distrito Garín Viejo, III Región. 63 p.; (b) Topgeo Ing. Ltda. (2016). Estudio de diagnóstico geológico, Distrito Hornitos Sur. 102 p.; (c) Dávila E. y Oviedo L. (2015). Estudio geológico distrital Llano del Tirado, Comuna de Tierra Amarilla - Provincia de Copiapó - Región de Atacama. 91 p.
- [8] Arévalo, C. (2005). Carta Los Loros, Región de Atacama. Sernageomin, Carta Geol. Chile. Serie Geol.Básica N°92, 54 p.[9] Mpodozis C. and Cornejo P. (2012). Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. Econ.Geol.Sp.Publ. 16, 329-360.

Provincias Metalogénicas de la región de Valparaíso

Roxana Ortega B.¹, Claudia Arredondo C.¹, Braulio Águila A.¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

El presente trabajo está basado en la publicación “Depósitos metalíferos de la región de Valparaíso, escala 1:500.000” (Ortega *et al.*, 2021), llevado a cabo por profesionales de la Unidad de Recursos Minerales del Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), el cual forma parte de un programa de alcance nacional, destinado a generar, actualizar y difundir información metalogénica del país. Para esa publicación se recopiló y actualizó la información de 603 registros de depósitos de minerales metálicos (RMM) de los cuales el 60% se validó en terreno. Se tomaron 580 muestras de mena, de alteración y de roca de caja, con el objetivo de identificar la mineralogía a través de secciones delgadas, pulidas y análisis de difracción de rayos X, lo que se complementa con 426 análisis químicos (óxidos mayores, tierras raras, trazas especiales, oro) para efectuar una caracterización geoquímica de los depósitos. Además, se realizó la compilación de 447 dataciones radiométricas, de las cuales 338 edades corresponden a minerales formadores de roca y 109 edades a minerales de alteración. Esta compilación incluye el resultado de 20 nuevas dataciones K-Ar, 40Ar-39Ar y U-Pb. Todos estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Sernageomin. El mapa obtenido a escala 1:500.000, se elaboró con base en unidades metalogénicas formadas por unidades geológicas representativas del área, agrupadas según los depósitos minerales relacionados y sus ambientes geológicos específicos.

Según el Anuario de la Minería de Chile, la producción minera de la región de Valparaíso representa, a nivel nacional, el 4,62% de Cu, 3,02% de Mo, 2,13% de Au y 7,79% de Ag (Sernageomin, 2022).

Estratigrafía y Unidades Metalogénicas

La región de Valparaíso se ubica en Chile central entre los 32 y 34° S, abarca una superficie de 16.396 km², y en ella se reconocen las siguientes unidades fisiográficas que se disponen longitudinalmente, paralelos al borde costero, de oeste a este: planicies litorales, cordillera de la Costa, Mediana Montaña, las cuales son cortadas por los valles transversales, y la cordillera de los Andes.

En esta región se exponen unidades geológicas volcánicas, intrusivas, metamórficas, sedimentarias marinas y continentales, cuyas edades abarcan desde el Carbonífero al Holoceno, y que son la evidencia de dos ciclos tectónicos, el Gondwánico y el Andino, ambos caracterizados como márgenes activos ubicados en el borde del pacífico de Sudamérica (Mpodzis y Ramos, 1990). La litología más antigua aflora en la cordillera de la Costa y está constituida por rocas intrusivas y metamórficas del Carbonífero-Pérmico, asignadas al Ciclo Tectónico Gondwánico, sin registrar eventos de mineralización metálica de interés económico en la región. Además, forman el basamento sobre el cual se instaló, discordantemente, una cobertura mesozoica-cenozoica, conformada por sucesiones volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales, del Triásico y el Plioceno, junto con sucesiones sedimentarias marinas y continentales del Pleistoceno-Holoceno.

Durante el Ciclo Tectónico Andino se evidencia un margen continental convergente, activo desde el Triásico Superior al Reciente, con el desarrollo de sucesivos arcos magmáticos de tipo calcoalcalino, de dirección principalmente N-S, cuyas edades decrecen hacia el este, y al cual se asocian diversos eventos de mineralización de origen hidrotermal reconocidos en el área. Además, esta región es parte de la zona de transición entre el segmento de subducción plana, entre los 28 y 33° S, y el segmento de ángulo de subducción normal, ubicado más al sur de esta latitud. El segmento de subducción plana, generada durante el Mioceno Inferior, está caracterizado por la ausencia de volcanismo en el Pleistoceno-Holoceno y el avance del frente de deformación hacia el oriente. Las unidades geológicas representativas del Ciclo Tectónico Andino contienen depósitos metalíferos de diferente naturaleza, principalmente de Cu, Mo, Au y Ag, y también de Pb, Zn, Mn, Fe y Co.

Los principales eventos de mineralización metálica están asociados a procesos hidrotermales relacionados, espacial y temporalmente, con la actividad magmática e incluyen yacimientos hidrotermales de diferentes tipos y tamaños, como pórfidos de Cu-(Mo) o de Au, estratoligados de Cu-(Ag), epitermales y mesotermiales de Au y de Cu, algunos *skarns* de Cu, además de otros tipos de depósitos de menor tamaño con recursos de Co, Fe, Pb, Zn y Mn. Esta mineralización está mayoritariamente controlada por sistemas de falla, fallas de carácter local, y algunas de desarrollo regional como el Sistema de Falla Pucuro y la Falla Río-Blanco-Los Bronces, así como también por la litología, determinada sobre todo por la permeabilidad de las rocas que integran las unidades metalogénicas.

Provincias Metalogénicas

Se identificaron 3 provincias metalogénicas dispuestas paralelas al borde costero, que de oeste a este son cordillera de la Costa, Mediana Montaña y Cordillera de los Andes.

Provincia metalogénica de la cordillera de la Costa ubicada en la cordillera homónima, comprende algunos afloramientos de rocas metamórficas e intrusivas del Carbonífero-Pérmico (CPem y CPeg), intruidas por extensos plutones triásicos-jurásicos (TrsJig y Jg), interpretados como parte de un arco magmático, que están cubiertas en discordancia y no concordancia por rocas volcánicas y sedimentarias marinas del Triásico Superior al Cretácico Inferior (TrsJsmv, Kivsm), intruidas por plutones cretácicos (Kg), distribuidos a lo largo de una franja N-S en la vertiente oriental de la cordillera de la Costa.

A pesar de que los restos del arco jurásico en esta región no están bien definidos, se entiende que estas rocas representan la evolución del sistema de arco magmático y cuenca de trasarco ubicada al este, fuera de esta provincia, desarrollado entre el Jurásico y el Cretácico Inferior, bajo un régimen de subducción convergente de alto ángulo, tipo Mariana, en condiciones tectónicas extensionales, con episodios transtensionales y transpresionales (Mpodozis y Ramos, 1990; Parada *et al.*, 1994; Boyce *et al.*, 2020). Cubren a las unidades anteriores, sedimentos clásticos continentales (MPc) y marinos (MPm), semiconsolidados del Mioceno al Plioceno, además de sedimentos fluviales y coluviales no consolidados del Pleistoceno-Holoceno (PIHsc).

Esta provincia se caracteriza por el predominio de fallas subverticales a verticales de rumbo NO-SE, con fallas subordinadas de rumbo NE-SO y N-S. La mineralización en esta provincia está principalmente relacionada con las fallas de dirección N-S, como ocurre en los distritos mineros Cabildo, La Patagua y El Soldado.

Los depósitos estratoligados de cobre con plata subordinada son los principales y más abundantes en esta provincia metalogénica. Forman parte de la franja de depósitos estratoligados de Cu-(Ag) de edad cretácica que se extiende desde los 30 a 34°S (Maksaev y Zentilli, 2002) y que en esta región se extienden tanto en la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa como de la Mediana Montaña. En la primera de estas provincias, la mayoría de estos depósitos están emplazados en la unidad metalogénica Kivsm (distritos Hierro Viejo, Cabildo, La Patagua, El Soldado, El Salado) y un grupo pequeño en la parte norte de la provincia, en la unidad metalogénica Kvscm (distritos Cerro Bayo y Cantarito). También depósitos tipo *skarn* de Cu están emplazados en la unidad metalogénica Kivsm (distritos mineros Cabildo, La Campana y Las Palmas).

Otro tipo de depósito existente en la región son vetas mesotermiales de Au y de Au-(Cu-Ag). Las primeras están alojadas en rocas de la unidad metalogénica del Triásico Superior-Jurásico, TrsJsmv (depósitos Pullalli y Fabiola) y en las rocas intrusivas de la unidad metalogénica Jg (distrito Cerro Álamo). El otro tipo de vetas está alojado en las rocas intrusivas cretácicas de la unidad metalogénica Kg (distrito Los Molinos).

Depósitos auríferos tipo placer están distribuidos preferentemente en la vertiente occidental de la cordillera de la Costa, contenidos en las unidades metalogénicas MPm, MPc y PIHsc, y han sido explotados desde tiempos prehispánicos (distrito minero Marga Marga).

De manera subordinada existen depósitos con características de tipo IOCG y relacionados con depósitos tipo *skarn* en el distrito Las Palmas, alojados en rocas volcánicas y sedimentarias de la unidad Kivsm. También, en forma aislada se generó la mineralización reconocida en el proyecto tipo pórfido de Au, Colliguay, emplazado en el sector sur de esta provincia metalogénica, en la unidad metalogénica TrsJsmv. Se ha reconocido puntualmente, depósitos tipo *skarn* de Fe en la parte norte de la provincia (depósito Cerro Imán), en la unidad metalogénica TrsJsmv, y en el distrito minero La Campana (depósito Mina de Hierro), en la unidad metalogénica Kivsm, siendo la única evidencia de explotación ferrífera en la región, ambas actualmente paralizadas. Por otro lado, el cobalto se explotó en la pequeña mina Terremoto, ubicada en la unidad metalogénica TrsJsmv, además de ser reconocido en forma subordinada en el distrito minero Cabildo, con un potencial desconocido pero interesante.

En esta provincia se definieron 3 épocas metalogénicas: la primera, en el Jurásico Superior, está caracterizada por depósitos vetiformes de tipo mesotermal de Au; la segunda época corresponde al lapso del Cretácico Inferior al Cretácico Superior bajo, que incluye una amplia diversidad de tipos de depósitos, siendo los estratoligados de Cu-(Ag) los más relevantes en cuanto a contenido metálico y distribución. También se reconocen depósitos tipo *skarn* de Cu, más algunos depósitos tipo Óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG), depósitos tipo mesotermiales de Au-(Cu, Ag) y un depósito tipo pórfido de Au; y la tercera época metalogénica corresponde al Mioceno-Holoceno asociada a depósitos tipo placer aurífero, distribuidos a lo largo de esta provincia. (Fig.1)

Provincia metalogénica de la Mediana Montaña, ubicada al este de la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa hasta el Sistema de Falla Pocuro ubicado al oriente, comprende rocas volcánicas y sedimentarias con edades desde el Cretácico Inferior alto hasta el Paleoceno (Kvscm, KsPavsc) intruidas por plutones y *stocks* del Cretácico al Eoceno (Kg, KsEg), representativos de sistemas de arco plutónico-volcánico, de ambiente continental. Éstos se asocian a un sistema de subducción tipo chileno, de ángulo normal, y a una tectónica compresional con varios pulsos compresivos que produjeron la inversión tectónica de cuencas a fines del Cretácico Inferior, el alzamiento de la cordillera de la Costa y la formación de depósitos sinorogénicos, en conjunto con la migración del arco hacia el oriente desde el Cretácico al Paleógeno (Eoceno) (Mpodozis y Ramos, 1990; Parada *et al.*, 2007; Boyce *et al.*, 2020). En forma muy subordinada se distribuyen rocas de las unidades metalogénicas volcánicas sedimentarias marinas y continentales Kivsm, OMivsc y Mvsc intruidas, la primera por plutones de la unidad metalogénica Kg, y las otras dos por rocas intrusivas del Mioceno-Plioceno (MPg). Las unidades metalogénicas de esta provincia están cubiertas por depósitos de la unidad metalogénica de depósitos sedimentarios continentales del Pleistoceno-Holoceno (PIHsc).

Existe un predominio de fallas de dirección N-S a NNO-SSE y NO-SE, y subordinadamente fallas NE-SO y E-O, las que tienen un estilo de deformación frágil y algunas evidencias de deformación dúctil local. En esta provincia metalogénica la mineralización principal está relacionada con las fallas NNO-SSE como ocurre en los distritos Quitalcura, Cerro Negro, Catemu y Bellavista.

Esta provincia metalogénica incluye depósitos vetiformes epitermales de sulfuración intermedia de metales preciosos y básicos Au, Ag, Cu-(Pb, Zn), que destacan en el distrito minero El Bronce, emplazados en rocas volcánicas de la unidad metalogénica Kvscm y en rocas volcánicas y sedimentarias de KsPavsc (distrito minero Risco del Diablo). En la parte central y sur de esta provincia metalogénica, emplazados en Kvscm, se concentran depósitos tipo estratoligados de Cu-(Ag), de los cuales los vetiformes predominan sobre los estratiformes (distrito minero Quitalcura). También destacan depósitos estratoligados de Cu-(Ag±Pb, Zn), como los identificados en los distritos mineros Cerro Negro y Catemu, acompañados de algunas escasas manifestaciones de Mn. Otros tipos de depósitos de cobre son los relacionados con sistemas de falla como los del distrito minero Jahuel y de la mina Yerba Loca, ubicados en las unidades metalogénicas Kvscm y KsPavsc, respectivamente.

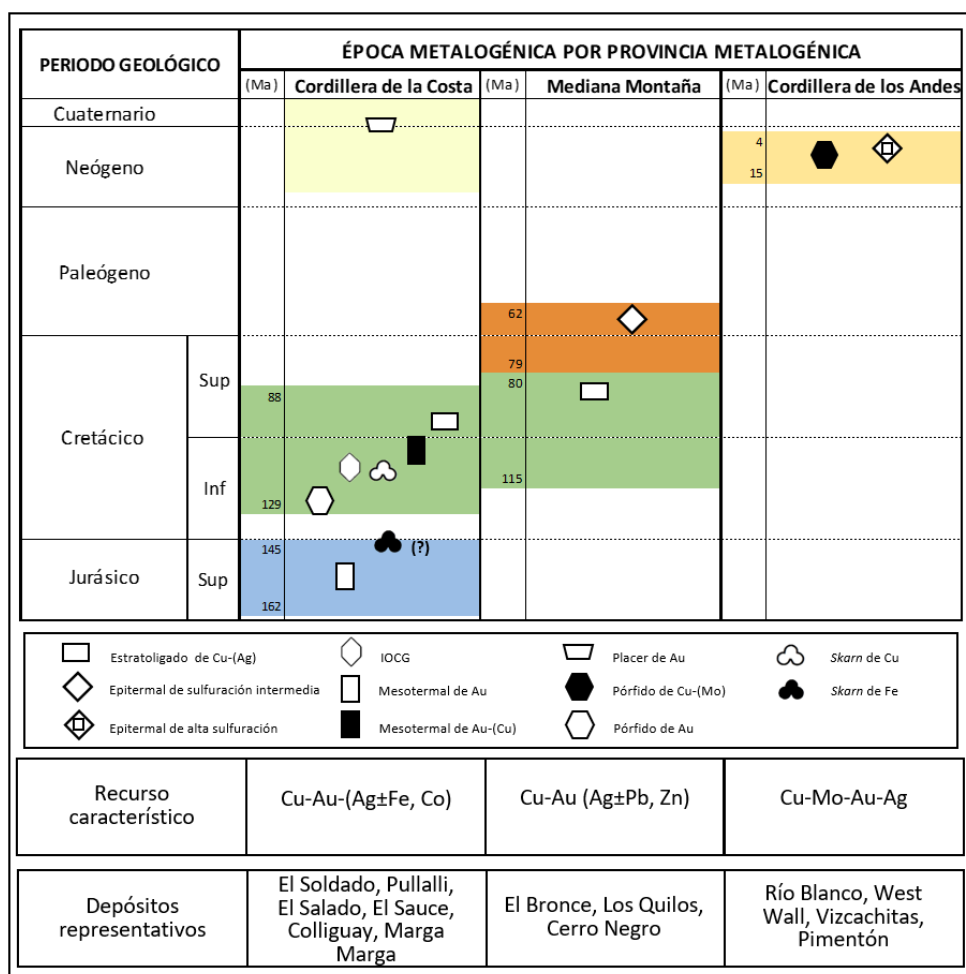


Figura.1. Cuadro resumen de las épocas metalogénicas con la distribución de los diferentes tipos de depósitos, según sus edades y provincias metalogénicas definidas en la región de Valparaíso. Se incluye, el recurso que caracteriza a cada provincia y el nombre de algunos depósitos representativos (Períodos geológicos no están a escala).

En esta provincia se definieron 2 épocas metalogénicas: la primera del Cretácico Inferior alto al Cretácico Superior bajo, asociada a los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) y polimetálicos (distritos mineros de Cerro Negro y Catemu); la segunda época comprende el lapso del Cretácico Superior al Paleoceno Inferior, representada por depósitos vetiformes con metales preciosos y por depósitos polimetálicos de tipo epitermal de sulfuración intermedia, como en el distrito El Bronce. (Fig.1.)

Provincia metalogénica de la cordillera de los Andes se distribuye desde el Sistema de Falla Pocuro hasta la frontera con Argentina y contiene potentes secuencias de lavas básicas con intercalaciones de rocas piroclásticas, del Oligoceno al Mioceno (OMivsc, Mvsc), intruidas por cuerpos hipabisales y subvolcánicos del Mioceno-Plioceno (MPg) representativos del arco volcánico del mismo periodo. En esta provincia se reconoce un evento de deformación compresional, a partir del Mioceno Inferior, que generó engrosamiento cortical y la deformación concentrada en el borde oriental de la provincia, en la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua ubicada en el límite con Argentina y compuesta por unidades sedimentarias marinas y continentales del Jurásico al Cretácico Inferior (Jmssm, Kivsm), donde no se ha reconocido mineralización metálica de interés.

Esta provincia se caracteriza por un predominio de fallas N-S a NE-SO y NO-SE. Los depósitos están ubicados en las intersecciones de las fallas de dirección NE-SO y NO-SE, de modo que las primeras habrían controlado el emplazamiento de plutones y la localización de los sistemas porfídicos que alojan mineralización, y las segundas habrían controlado el desarrollo de las brechas hidrotermales mineralizadas. Es el caso de los yacimientos en el distrito minero Río Blanco-Los Bronces.

Los depósitos representativos de esta provincia son los pórfidos de Cu-(Mo) del Mioceno, que son parte de una franja mayor del Mioceno-Plioceno, que se extiende en forma longitudinal desde la región de Coquimbo hasta la de O'Higgins.

En esta provincia se definió la época metalogénica del Mioceno Medio al Plioceno, caracterizada por depósitos tipo pórfido de Cu-(Mo), como el megayacimiento del distrito minero Río Blanco-Los Bronces, explotado como gran minería y conformado por un clúster de intrusivos porfídicos, con mineralización diseminada y *stockwork*, y con un sistema de brechas magmático-hidrotermales sobrepuestas. Además, son representativos de esta época metalogénica un conjunto de proyectos y prospectos de pórfidos cupríferos como *West Wall*, Vizcachitas y Amos, que son el resultado de la exploración tipo *greenfield* en el área. Se les suma el depósito Pimentón, descrito como un depósito vetiforme epitermal de alta sulfuración, explotado por metales preciosos. (Fig.1).

Conclusiones

Los depósitos minerales de tipo mesotermiales, formados ca. 156 a 154 Ma, serían contemporáneos a los intrusivos jurásicos y coincidentes con la tectónica en el sector del arco magmático, definida como de ambiente dúctil en condiciones tectónicas transpresionales (Creixell *et al.*, 2011). La alteración tipo greisen en el sur del distrito Marga Marga se asociaría al alzamiento cortical del Jurásico Superior de la zona y al origen del magma parental de los diques asociados a la mineralización aurífera.

Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) de la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa se asocian a eventos metalogénicos del Cretácico Inferior alto, con edades radiométricas entre ca. 115 y 88 Ma, alojados en sucesiones volcánicas y sedimentarias del Cretácico Inferior, en una posición periférica y distal a los intrusivos contemporáneos. Los de la Mediana Montaña están asociados a rocas representativas de cuencas de intrarco (Kvscm), ubicadas al este del arco volcánico del Cretácico Inferior, evidenciadas por las intercalaciones de rocas sedimentarias con clastos de origen volcánico y rocas calcáreas, como las ubicadas en el distrito minero de Cerro Negro, además de vetas polimetáticas, junto con ocurrencias de Mn volcanogénico estratoligado, cuya edad de formación se estima en el Cretácico Inferior alto.

Los depósitos epitermales de Au, Ag y Cu, como los sistemas de vetas de sulfuración intermedia se habrían emplazado bajo un régimen tectónico compresional relacionado con un ambiente volcánico y subvolcánico, preservado por su emplazamiento hacia finales de la fase de deformación Peruana, con posterioridad a los principales eventos de alzamiento y erosión.

Los depósitos tipo pórfido cuprífero de la provincia metalogénica de la cordillera de los Andes se habrían formado bajo regímenes tectónicos compresionales a transpresivos, asociados a sistemas de fallas que favorecieron la diferenciación magmática y la acumulación de volátiles (Piquer *et al.*, 2021). La formación de los cuerpos de brecha se relaciona con períodos de descompresión, generados por un rápido solevantamiento tectónico y exhumación, posiblemente como episodios transitorios y locales de extensión ligados a la actividad sísmica (Mpodozis y Cornejo, 2012).

Palabras Clave: Provincia metalogénica, época metalogénica.

Financiamiento: Sernageomin, Subdirección Nacional de Geología, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos.

Agradecimientos: Se agradece al personal de Sernageomin, Enami, Sonami y empresas mineras visitadas, por colaboración en este trabajo. La Subdirección Nacional de Geología del Sernageomin auspicia esta contribución.

Referencias:

- Boyce, D.; Charrier, R.; Farías, M. 2020. The first Andean compressive tectonic phase: Sedimentologic and structural analysis of mid-Cretaceous deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile. *Tectonics* 3.9
- Creixell, C.; Parada, M.; Morata, D.; Vázquez, P.; Pérez de Arce, C.; Arriagada, C. 2011. Middle-Late Jurassic to Early Cretaceous transtension and transpression during arc building in Central Chile: evidence from mafic dike swarms. *Andean Geology* 38(1).
- Maksaev, V.; Zentilli, M. 2002. Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. In *Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective* PGC Publishing 2.
- Mpodozis, C.; Ramos, V.A. 1990. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its Relationship to Hydrocarbon and Mineral Resources* Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series 11.
- Mpodozis, C.; Cornejo, P. 2012. Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. SEG, Special Publication 16.
- Ortega, R.; Moscoso, R.; Arredondo, C.; Águila, B.; Mateo, L.; Pantoja, G. 2021. Depósitos metalíferos de la región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 36: 219 p., 1 mapa escala 1:500.000. Santiago.
- Parada, M.A.; Nyström, J.O.; Levi, B. 1994. The Coastal Batholith of Central Chile (31°-34° S): arc magmatism progressively more immature with time. In *Congreso Geológico Chileno*, No.7.
- Parada, M.; López, L.; Oliveros, V.; Fuentes, F.; Morata, D.; Calderón, M.; Aguirre, L.; Féraud, G.; Espinoza, F.; Moreno, H.; Figueroa, O.; Muñoz, J.; Troncoso, R.; Stern, C. 2007. Andean magmatism. In *The Geology of Chile*. The Geological Society.
- Piquer, J.; Sánchez-Alfaro, P.; Pérez-Flores, P. 2021. A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation. *Geology* 49 (5).
- Sernageomin. 2022. Anuario de la Minería de Chile 2021. Servicio Nacional de Geología y Minería: 279 p. Santiago.

Anatomy of a Moderated Telescoped Porphyry – High Sulfidation System: Insights of a 2-km-long Vertical Profile of Alteration at Valeriano Cu-Au Deposit, Chile

Jaime Osorio¹, Omar Torres², Francisco Bravo², Raymond Jannas², David Cooke¹, Lejun Zhang¹, Ivan Belousov¹

(1) University of Tasmania, Centre for Ore Deposit and Earth Sciences (CODES), Private Bag 79, Hobart, Australia

(2) ATEX Resources, Alonso de Córdova 5870, Las Condes, Santiago, Chile

The Valeriano Cu-Au deposit lies at the northern end of the El Indio metallogenic belt in the Chilean Central Andes (Fig. 1), a region well-known for its prolific Au-Ag high-sulfidation epithermal deposits. Deep drilling at the Valeriano lithocap in the last decade resulted in a discovery of a concealed porphyry Cu-Au system at depth, unveiling a unique 2-km-long vertical profile of alteration from the shallow high-sulfidation epithermal to the porphyry environment. The Valeriano deposit is hosted mainly in felsic early Permian to Middle Triassic volcanoclastic rocks and near the surface by intermediate composition middle Miocene volcanics. Porphyry-style mineralization is temporally and spatially associated with the emplacement of the hornblende-biotite granodiorite Valeriano porphyries and associated magmatic-hydrothermal breccias between 10.29 ± 0.16 and 10.09 ± 0.19 Ma, which produced high-grade Cu-Au mineralization of chalcopyrite and lesser bornite coupled with potassic alteration. Potassic alteration is overprinted by classic white mica-quartz (phyllic) alteration containing chalcopyrite and pyrite. This assemblage grades upward into a thick zone of short-wavelength white mica - quartz $\pm$ pyrophyllite that is intimately associated with low-grade high-sulfidation state Cu-Fe sulfides and Cu-Au sulfosalts dominated by covellite and chalcocite, and the development of wormy textures at the base of the lithocap. The upper part of the lithocap consists of concentrically zoned aluminosilicate alteration dominated by different proportions of alunite, kaolinite, and pyrophyllite, centered on stratiform or structurally controlled zones of vuggy and massive quartz. Vuggy quartz hosts enargite-bearing epithermal mineralization that occurs from proximal to distal in breccias, veins, and infills spatially associated with druse quartz. New geochronological results suggest that cooling of the magmatic-hydrothermal system and most of the porphyry and epithermal mineralization took place in a period between 230 and 120 k.y.

Keywords: Porphyry deposit, High-sulfidation mineralization.

Acknowledgements: This research is part of an ongoing Ph.D. project of the first author at the University of Tasmania and part of AMIRA P1202.

Génesis de vetas masivas de Cu con fuerte control estructural en la Cordillera de la Costa de la Región de Coquimbo, Mina Los Primos (31°S)

Andrés Pávez Alvarado¹, Rocío Rudloff Del Villar¹, Carlos Marquardt², Katherine Toro Abarzúa², Hugo González C.³

(1) GEO-3 EIRL, Camino Santa Rosa 3040, PC15, Lampa, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Minería - Departamento de Estructuras y Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(3) ENAMI, Fomento Zona Centro Sur, Eduardo De La Barra 205, La Serena, La Serena, Chile

Los yacimientos de cobre en la Cordillera de la Costa de Chile, en la IV región de Coquimbo, han sido objeto de estudios geológicos y geofísicos durante varias décadas. En el marco del estudio del proyecto minero Los Primos ubicado a los 31°S, con la finalidad de determinar la geometría de los cuerpos mineralizados y comprender el estilo y génesis de la mineralización, así como estimar los recursos potenciales, se entrega nueva información con respecto a ello y a controles estructurales de yacimientos de la franja metalogénica del jurásico-cretácico. Para lograr estos objetivos, se llevaron a cabo trabajos de mapeo geológico-estructural en el interior de la mina, extracción de muestras de los frentes de explotación para análisis geoquímico, estudios petrográficos y calcográficos.

La geología regional del proyecto está formada por rocas metamórficas del Complejo Metamórfico del Choapa, de edad Silúrica Devónica, y rocas sedimentarias de la Formación Huentelauquén, de edad Carbonífero Superior a Pérmico Inferior, todas ellas cortadas por rocas intrusivas de tipo sienogranitos y granodioritas de la Super Unidad Mincha, de edad Jurásica a Cretácica. También se observan en esta zona diques de pórfidos dioríticos y andesíticos que intruyen a las rocas mencionadas, pero que no han sido datados.

En el área de estudio, se han reconocido esquistos micáceos, metareniscas (cuarcitas), rocas de tipo metandesita a metabasita (rocas de protolito volcánico), esquistos dinámicos, cherts y pizarras, con rumbos NNE y manteos promedio de 38°E. Se observan intrusivos tonalíticos de anfíbola y diques dioríticos sin alteración ni mineralización. La alteración de las rocas metamórficas incluye clorita, albita-epidota y cuarzo, y la mineralización consiste principalmente en una veta masiva de pirita, calcopirita, enargita y ocasionalmente bornita. También se han observado vetillas finas de albita-epidota y cuarzo con mineralización de pirita-calcopirita.

En cuanto a la geología estructural regional, se reconocieron estructuras de rumbo NS-NNE, que podrían ser parte de una extensión hacia el sur de la falla Pachingo o hacia el norte del sistema de falla Millahue-Silla del Gobernador. Este sistema de falla podría explicar la deformación existente en la zona, generada en un contexto de cambio de régimen tectónico de transpresión a compresión en el Cretácico medio.

La mineralización masiva de sulfuros de Cu y Fe se concentra a lo largo de una milonita, donde se ha reconocido, por ejemplo, Cpy con texturas de cola y flexuras dúctiles de la veta masiva que generan un cambio en sus manteos de 50-70° a 10-30°. Hasta ahora no hemos reconocido la fuente de la mineralización como diques tal como sería el caso de vetas auríferas de distritos de Talca ubicado más al norte, o en el distrito de Canela, más al sur; caracterizadas por tener menas de Au y Ag, además del Cu.

Palabras Clave: vetas Cu, deformación dúctil, geología estructural, basamento metamórfico.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por SLM Restauradora I de Punitaqui y por GEO-3 EIRL.

Agradecimientos: A SLM Restauradora I de Punitaqui para publicar los antecedentes geológicos de Mina Los Primos para fomentar el reconocimiento de estilos de mineralización hasta ahora poco comunes en Chile.

Referencias:

- Brian, M. y Gilligan, L., 1989. Durchbewegung structure, piercement cusps, and piercement veins in massive sulfide deposits: formation and interpretation. *Economic Geology*. Vol. 84, 1989, pp. 2311-2319.
- González H. 2021. Mina Los Primos 1/15, Comuna de Punitaqui, Una novedad geológica: Estructuras "Durchbewegung". ENAMI. Informe Inédito 6p.
- Grez E., Dávila E. (2016). Estudio Geológico Distrito la Higuera de Quiles, comuna de Punitaqui, Región de Coquimbo. ENAMI. Informe Final, Inédito. 71 p.
- Latorre, J.J. 2021. Informe Geológico Mina Los Primos. SLM Restauradora Primera de Punitaqui. Informe Inédito 5 p.
- Paredes, Y. 1989. Informe geológico de la campaña de sondeos mina Retén de San Pedro de Quiles, Punitaqui, IV Región (Inédito), Sociedad Legal Minera Flor del Azulillo de Huilmo: 48 p. La Serena.
- SERNAGEOMIN-BRGM. 1994. Proyecto Carta Metalogénica Región V/IV Sur. Servicio Nacional de Geología y Minería-Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Informe Registrado, IR-94-02, 5 Vol. Escala 1:250.000, Santiago.
- Serrano, R. 1993. Proyecto de Explotación del Yacimiento de Cobre "Retén" S.L.M., Talinay, Ovalle, 4a. Región. Empresa Nacional de Minería, Subgerencia de Minería, Zona centro sur: 37 p.

La Geofísica Calibrada: una herramienta para optimizar la Exploración Brownfield y Near-mine. Ejemplos en distintos tipos de depósitos minerales

Andrés Pávez Alvarado¹, Rocío Rudloff Del Villar¹, Luis Moreno Ibarra², Percy Salazar Sandoval³, Martin Marquardt Román⁴, Juan Carlos Toro George⁵

- (1) GEO-3 EIRL, Camino Santa Rosa 3040, PC15, Lampa, Santiago, Chile
 (2) ALXAR Minería, Gerencia de Geología y Exploraciones, Av. El Golf 150, Piso 16, Las Condes, Santiago, Chile
 (3) Marcobre, Gerencia de Exploraciones, Lorenzo Bernini 149, piso 3 - San Borja, Lima, Perú
 (4) Minería Activa, Gerencia de Geología, Presidente Riesco 5335, Oficina 2104, Las Condes, Santiago, Chile
 (5) Exploraciones Mineras S.A., Gerencia de Geología, Av. Vitacura 2670, oficina 902, Las Condes, Santiago, Chile

Uno de los aspectos importantes en la exploración de recursos geológicos hoy en día es la posibilidad de estimar rápidamente el potencial de algún Proyecto. Para ello la geofísica siempre ha sido usada como una herramienta complementaria, pero muchas veces desligada de los antecedentes geológicos del Proyecto. Por el contrario, cuando esta es integrada y calibrada con la geología, sean estos datos de escasos o numerosos sondeos, modelos geológicos robustos o hipótesis de exploración, los modelos resultantes permiten optimizar los recursos de exploración en forma significativa. Dichos modelos de propiedades físicas de las rocas, basados en la calibración de la geofísica, se pueden usar como un proxy para una estimación temprana del potencial de exploración de un Proyecto, como también para explorar en forma más certera zonas de brownfield y Near-mine.

Los modelos resultantes de cualquier inversión de levantamientos geofísicos consisten generalmente en buscar aquella distribución de propiedades físicas del sustrato que cumpla con una minimización del error entre el modelo calculado y las observaciones. Muchos de estos modelos si bien son matemáticamente impecables, distan mucho de la realidad geológica que es más compleja, anisótropa y heterogénea. Una forma de acercarse a dicha realidad es hacer uso de un modelo geológico definido, sea este hipotético o bien soportado por miles de sondeos. Así, mediante el uso de condiciones geológicas de borde para modelar (invertir) los mismos datos, se puede disminuir el abanico de soluciones posibles a un número más reducido de modelos que se integren de mejor manera con la geología. Esta metodología se puede usar ya sea con datos nuevos, como también con datos de archivo y permite tener una capacidad de pronóstico en los sondeos recomendados cercana al 95% de certeza. Así, esta herramienta se convierte además en un complemento para la caracterización temprana de Proyectos de Exploración.

En esta contribución se muestran resultados de distintos proyectos de distintos tamaños y distintos tipos de mineralización que validan nuestra innovadora metodología. Estos resultados han permitido entre otros:

- Validar una mejor hipótesis de exploración de un sistema de pórfido cuprífero en Chile.
- Optimizar y rectificar una campaña de sondeos en un proyecto de exploración avanzada en un sistema de vetas polimetálicas en Chile
- Estimar en forma temprana un potencial de exploración de un proyecto de tipo IOCG en Chile
- Apoyar la exploración Brownfield y Near-Mine con el descubrimiento de nuevos recursos mineros para un IOCG en Perú.

La calibración de la geofísica es una metodología que convendría usar con mayor frecuencia para dinamizar la exploración de recursos geológicos, más aún cuando nuevos cambios en la industria nos empujan a ser más eficaces en la revisión de proyectos.

Palabras Clave: Geofísica Calibrada, Evaluación Temprana de Proyectos, Exploración BrownField, Exploración Near-Mine, Caracterización Geológica.

Financiamiento: El desarrollo de este trabajo ha sido financiado por GEO-3 EIRL.

Agradecimientos: A nuestros clientes por permitirnos mostrar parte de resultados reales con la finalidad de mejorar las prácticas de la industria.

Referencias:

- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. (2004). Applied Geophysics. Cambridge University Press, New York, 2º ed., 774 pp.
- Moreira C. A., Rezende Borges M., Lira Vieira G. M., Malagutti Filho W., Fernandes Montanheiro M. A. (2012). Geological and geophysical data integration for delimitation of mineralized areas in a supergene manganese deposits. Geofísica Internacional. 53-2: 199-210.
- Araujo da Silva C. D., Vaz Parente C., Stevanato R., Espindola Canata R., Leopoldino Oliveira K. M. (2022). Integration of induced polarization, resistivity, and magnetic data of IOA occurrences in Ararenda, western of the Santa Quiteria magmatic arc, Ceará Brazil. Journal of South American Earth Sciences. Vol.113, 103624. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103624>.
- Revil, A., Vaudelet, P., Su, Z., Chen, R. (2022). Induced Polarization as a Tool to Assess Mineral Deposits: A Review. Minerals 2022, 12, 571. <https://doi.org/10.3390/min12050571>.
- Fullagar P. K., Pears G. A., McMonnies B. (2008). Constrained inversion of geologic surfaces— pushing the boundaries. The Leading Edge 27: 98-105. <https://doi.org/10.1190/1.2831686>.

Dos Amigos: Resultados de exploración y potencial de crecimiento del Distrito Domeyko, Región de Atacama, Chile

Julio Pérez Becker¹, Tomas Swaneck², Alejandro Contreras³, Patricio Navarrete⁴, Claudio Muñoz⁴

(1) Geólogo Senior Exploraciones, Cemin Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(2) Jefe de Geología Domeyko, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(3) Gerente Corporativo de Exploraciones y Geología, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(4) Geólogo Especialista, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, Santiago, Chile

Dos Amigos se define como un depósito tipo Pórfido Cuprífero perteneciente a la franja cretácica, con edades radiométricas que fluctúan entre los 110 y 104 Ma, ubicado en la Región de Atacama a 140 km al norte de la ciudad de La Serena. Este depósito ha sido históricamente explorado por diferentes compañías desde la década del sesenta, siempre con foco en los recursos supérgenos. Sin embargo, en los últimos dos años el nuevo equipo de exploración del Holding CEMIN, identificó un volumen significativo de recursos hipógenos de Cu-Au y nuevos targets de exploración dentro del distrito.

Este depósito se emplaza en rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre las que son intruidas por cuerpos de composición cuarzo-diorítica, responsables de la mineralización del sistema. En términos de la alteración hidrotermal se tiene un núcleo potásico caracterizado por la asociación biotita-magnetita que grada hacia una zona cuarzo-sericitica y finalmente, en la parte alta del sistema, una zona de alteración argílico avanzada caracterizada por cuarzo-alunita. La mineralización se encuentra tanto en vetillas como diseminada y principalmente restringida al núcleo potásico, siendo la mena principal calcopirita, con trazas de bornita y créditos de oro. De las campañas realizadas se tienen siete interceptos con amplias zonas de mineralización primaria de Cu-Au, que en su mayoría se encuentran muy cercanos a la superficie:

DDH-034: 446m @ 0,51% CuT + 0,47 ppm Au (0,75% CuEq)

DDH-039: 404m @ 0,44% CuT + 0,38 ppm Au (0,63% CuEq)

DDH-2101: 518m @ 0,40% CuT + 0,25 ppm Au (0,53% CuEq)

DDH-2102: 580m @ 0,30% CuT + 0,25 ppm Au (0,43% CuEq)

DDH-2103: 336m @ 0,30% CuT + 0,22 ppm Au (0,41% CuEq)

DDH-2202: 594m @ 0,40% CuT + 0,24 ppm Au (0,52% CuEq)

DDH-2203: 252m @ 0,37% CuT + 0,3 ppm Au (0,52% CuEq)

Al integrar estos resultados con toda la información geológica disponible (mapeo superficie, geoquímica, geofísica, espectrometría, data histórica) se construyó un modelo geológico y de recursos, dando como resultado un Recurso Mineral Inferido de 500 Mt con ley media 0,44% CuEq. Dichos recursos fueron evaluados económicamente mostrando un atractivo caso de negocio con potencial de crecimiento, considerando además los nuevos targets dentro del distrito y los excelentes habilitadores con los que cuenta.

En vista del reciente hallazgo de importantes recursos hipógenos no reconocidos hasta ahora, se postula que el potencial del distrito Domeyko se encuentra abierto y hasta el momento sub-explorado.

Palabras Clave: Hallazgo, Cretácico, Hipógeno.

Tricolor: Modelo de exploración y su impacto para el desarrollo del Distrito Domeyko, Región de Atacama, Chile

Julio Pérez Becker¹, Tomas Swaneck², Alejandro Contreras³, Patricio Navarrete⁴, Claudio Muñoz⁴

(1) Geólogo Senior Exploraciones, Cemin Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(2) Jefe de Geología Domeyko, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(3) Gerente Corporativo de Exploraciones y Geología, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, piso 7, Santiago, Chile

(4) Geólogo Especialista, CEMIN Holding Minero, Miraflores 178, Santiago, Chile

Tricolor es un blanco de exploración del tipo pórfido cuprífero perteneciente a la franja cretácica, con edades radiométricas entre 108 y 104 Ma (U-Pb), en el que se observan evidencias de alteración hidrotermal, interceptos económicos, anomalías geoquímicas distritales y zonas anómalas identificadas en levantamientos geofísicos. Se ubica 4 km al norte del Pórfido Dos Amigos (PDAM) y se caracteriza por una serie de intrusivos de composición cuarzo-diorítica que se encuentran intruyendo a rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre. Dichos cuerpos son los responsables de la mineralización, asociada a una alteración potásica de biotita-magnetita con mena principal calcopirita y oro subordinado.

El área en cuestión ha sido históricamente muy poco explorada, registrando solo explotación de mineralización supérgena al final de la década de los noventa, iniciando con minería subterránea y luego desarrollando una pequeña cantera de 150 x 150 m. Dentro de los trabajos históricos se tiene una serie de pozos ejecutados el 2019, que no superan los 70 m de largo y sólo dos de 230 m promedio. Luego de dicha campaña, no se realizaron más trabajos en el área, hasta que, en el año 2022 el nuevo equipo de exploración del Holding CEMIN retomó las actividades, comenzando con una acuciosa revisión conceptual, de la cual se identificaron los siguientes interceptos:

DDH-035: 250m @ 0,45% CuT + 0,32 ppm Au (0,61% CuEq)

DDH-021: 154m @ 0,33% CuT + 0,36 ppm Au (0,52% CuEq)

P-003: Con un largo total de 57 m en los cuales los últimos 27m promedian 0.44% CuT

Lo anterior, no solo evidenció la proyección en profundidad del sistema constreñido a la cantera, sino que además vectoriza en dirección a una zona cubierta, sin labores ni trabajos de exploración anteriores. Estas evidencias alentaron el desarrollo de un trabajo sistemático y más ambicioso, comenzando con:

* Mapeo geológico escala 1:2.000, el que dio como resultado una extensión del sistema hidrotermal en 1.5km más al norte de la zona históricamente explotada, donde destaca una amplia zona de alteración potásica relicta.

* Geoquímica de superficie distrital, que arrojó conspicuas anomalías de elementos trazadores de la mineralización como Cu, Mo, Pb, Zn, Bi, Sb.

* Levantamientos geofísicos de magnetometría y polarización inducida, calibrados con la zona de mineralización demostrada en PDAM. Los resultados identifican una anomalía magnética de 500x750m. Asimismo, la polarización inducida también muestra una zona anómala de tamaño similar (500x900m), caracterizada por respuestas en cargabilidad intermedia – alta y conductividades altas. Ambas anomalías identificadas, poseen una impronta muy similar a lo observado en PDAM.

Dado todos los antecedentes, se estima un recurso económico relevante para el distrito. Este recurso se encontraría bajo una cobertura con una potencia de 50 a 60 m. Esta hipótesis, será confirmada dentro de los próximos meses con una campaña de perforación diamantina y los resultados de dicho programa serán presentados en este congreso. Respecto al impacto que tendría el hallazgo de este recurso, podría significar un importante aumento del valor actual de lo que CEMIN ha definido como “Proyecto Domeyko Sulfuro”, posicionando al Distrito Domeyko como una zona tremendamente atractiva para el desarrollo minero futuro.

Palabras Clave: Cretácico, Target, Hallazgo.

Nuevos antecedentes geológicos del depósito aurífero Fénix Gold, Atacama, Chile

Ignacio Ramos Carrasco¹, Manuel Alarcón², Sergio Rojas², Jessica Aguilera³, Hessel Bierma⁴

(1) Snowline Gold Corp, 1012 - 1030 W Georgia Street, Vancouver, Canada

(2) Minera Nittetsu Chile

(3) Consultoría e Investigación Geológica Ambiental (CIGEAL Ltda)

(4) First Quantum Minerals Chile

El depósito Fénix (ex Cerro Maricunga) localizado en la franja metalogénica del Mioceno, ha sido previamente clasificado como un sistema transicional pórfido-epitermal (Lomheier, 2019). Posteriormente Amawta (2021), lo describe como una serie de estructuras tipo maar-diatremas levemente erosionada intruyendo un complejo de domos. A partir de este concepto, se han reinterpretado y generado nuevos estudios geológicos, geocronológicos, geoquímicos y geofísicos, para caracterizar el depósito y generar nuevas guías de exploración en la franja de Maricunga.

Se ha determinado que el depósito Fénix es un sistema maar-diatrema levemente erosionado, que se desarrolla dentro de un complejo de domos, a través de un detallado estudio de facies volcánicas logrando clasificar las unidades en pre-freatomagmatismos, freatomagmáticas y tardías. Estudios geocronológicos mediante análisis U-Pb en circones han revelado que el evento freatomagmático asociado al depósito ocurre entre los 16.2 a 15.6 Ma. (Rojas, 2022), situándolo en la misma época de la formación del volcán Ojo de Maricunga que lo hospeda.

La mineralización en el depósito Fénix se encuentra tanto en brechas como en vetillas de cuarzo bandeado denominadas "Black Banded Vein" (BBV). Las vetillas presentan características distintivas, como espesores milimétricos a centimétricos, bordes sinuosos e irregulares, y texturas de ebullición botroidal. El oro está mineralógicamente principalmente como granos libres, asociado a cristales de cuarzo, hematita-magnetita y óxidos de cobre, con tamaños de grano que van desde 2 a 50 µm.

Las anomalías de oro son un indicador clave para la exploración en el depósito Fénix. Se ha observado una correlación entre el oro y bajos valores de cobre y zinc en las muestras analizadas mediante lecturas ICP de multielementos. Los elementos volátiles como arsénico, mercurio, plomo, bismuto, antimonio y telurio no presentan anomalías significativas, y los valores de plata son menores a 0,5 g/t.

La alteración hidrotermal argílica constante en todo el depósito, dominada por montmorillonita y nontronita, identificadas por estudios de espectrometría sistemática y puntuales de TSCAN. Estas esmectitas se presentan desde superficie hasta más de 600 m de profundidad sin muestras de gradaciones horizontales ni verticales. De esta forma se descartan interpretaciones previas de alteración argílica avanzada en superficie y alteración potásica en profundidad.

Los estudios geofísicos han demostrado su utilidad en la caracterización del depósito Fénix. La magnetometría ha identificado un cuerpo magnético subhorizontal asociado a la mineralización, mientras que los estudios de magnetotelúrica han permitido identificar las discontinuidades de los ductos de las diatremas.

En resumen, el depósito Fénix Gold es un sistema maar-diatrema que se desarrolló hace aproximadamente 15.8 millones de años. La mineralización se encuentra en brechas y vetillas de cuarzo bandeado, y está asociada a un evento hidrotermal cuarzo-magnetita-esmectita. Los resultados de los estudios geocronológicos han proporcionado una mejor comprensión de la cronología del depósito y han generado prospectos de exploración adicionales en el área.

Palabras Clave: Freatomagmatismo, Domos, Fenix Gold, Exploración, Diatrema.

Financiamiento: Fenix Gold Limited.

Agradecimientos: Fenix Gold.

Referencias:

- Clavero, J. & Ramírez, V 2021. Análisis de facies volcánicas proyecto Fénix, región de Atacama. Amawta consultores Ltda. Reporte Interno
- Lohmeier, S. 2019. Magmatic evolution of the Cerro Maricunga gold porphyry-epithermal system, Maricunga belt, N-Chile. Journal of South American Earth Sciences, 92, 374-399.
- Rojas, S. 2022. Evolución magmática de los domos asociados al proyecto aurífero Fenix Gold, complejo volcánico Cerro Maricunga. Región de Atacama, Chile. Memoria de Título. Universidad de Atacama.

Propuesta de Modelo y Evolución Estructural del Yacimiento Radomiro Tomic, Distrito Chuquicamata

Rodrigo Rojas-Arancibia¹

(1) Gerencia de Planificación Distrital, Vicepresidencia de Operaciones Norte, CODELCO., Calama, Chile

Introducción

Radomiro Tomic (RT) se ubica en la Cordillera de Domeyko del norte de Chile, inmediatamente al norte del yacimiento Chuquicamata, en el distrito cuprífero homónimo. Corresponde a un depósito tipo pórfido de cobre y molibdeno del Eoceno medio - Oligoceno temprano. Sus recursos reconocidos suman un total de 9.450 Mt con una ley media de 0,44 %Cu (ley de corte 0,2 %Cu). El yacimiento fue descubierto en la década de 1950, sin embargo, su caracterización y delineamiento se profundizó durante las últimas dos décadas del siglo XX, permitieron una mejor comprensión del modelo geológico-estructural del depósito, iniciando finalmente su explotación a rajo abierto el año 1997, la que se mantiene hasta el presente.

Actualmente el modelo geológico de Radomiro Tomic está soportado por más de 4.500 sondeos geológicos que suman 1.330.000 m. Durante 2022 el yacimiento produjo un total de 301.000 ton de Cu fino, siendo ese año la operación minera más productiva en el Distrito Norte de CODELCO.

Los estándares de seguridad de la operación minera han restringido la captura de información geológica estructural y cinemática directamente desde los bancos de producción, por lo tanto, los análisis e interpretación de eventos deformativos se basan, principalmente, a partir de información de mapeo de bancos a distancia, revisión de sondeos diamantinos, las distintas relaciones de contacto entre las unidades litológicas, zonaciones de mineralización y de alteraciones, distribución espacial de las variables Cu, Mo y As, así como también, las interpretaciones de lineamientos y estructuras distritales.

En base a esta nueva información y actualización geológica, se propone una reinterpretación del modelo estructural de Radomiro Tomic para responder de mejor forma a la evolución estructural del yacimiento y la distribución de su mineralización hipógena y supérgena.

Marco Geológico Distrital

El Distrito Chuquicamata presenta un marcado rasgo estructural, dominado por la estructura regional denominada Falla Oeste, la cual divide al distrito Chuquicamata en dos bloques geológicos con distintas unidades y características geológicas (Tomlinson *et al.*, 2018, Skarmeta, 2021; Camus y Castelli, 2021).

El bloque oriental está dominado por rocas plutónicas paleozoicas, intrusivos y rocas volcano-sedimentarias triásicas, restringidos sedimentos marinos jurásicos, y pórfidos del Eoceno medio - Oligoceno temprano que hospedan los depósitos de cobre-molibdeno Chuquicamata y Radomiro Tomic, los principales yacimientos del distrito. Por otra parte, el bloque occidental está constituido por rocas marinas jurásicas y volcano-sedimentarias del cretácico que son intruidas por plutones terciarios pre-minerales que hospedan en su parte sur los depósitos cupríferos de Ministro Hales y Cluster Toqui.

Otro rasgo estructural importante en el distrito es el Sistema de Falla Mesabi. Según Tomlinson *et al.* (2018), el Sistema de Falla Mesabi corresponde a una zona de fallas, frágiles y dúctiles, de ca. 14 Km de largo que aflora desde el sector SE del rajo abierto de Chuquicamata, donde tiene una orientación de N20-30°E, hasta la falda de los cerros de Chuquicamata donde su rumbo cambia progresivamente a N77°E. En el borde este del rajo de Chuquicamata este sistema se conoce como Zona de Deformación o de Cizalla Este, tiene una actitud N20°E/80°NW y en su interior se incluyen "roof pendant" de sedimentitas de edad jurásica y el desarrollo de bandas miloníticas contemporáneas al emplazamiento y evolución del pórfido cuprífero (Valdivia, 2017). Al este de RT este sistema está representado por una estructura continua de rumbo N5-15°E/70-80°W, que pone en contacto a la Granodiorita Elena con la Secuencia volcano-sedimentaria triásica (Figura 1A).

El núcleo del yacimiento Radomiro Tomic se ubica a 1 km al este de Falla Oeste (su parte sur está a 500 m de la falla) y a 2 km al oeste de una traza del Sistema de Falla Mesabi. Está alojado en rocas del Complejo Porfídico Chuquicamata (Pórfido Chuqui) de edad Eoceno medio - Oligoceno temprano (Tomlinson *et al.*, 2018), que en RT tiene una edad muy próxima a 35 Ma (Virmond y Chelle-Michou, 2022), el cual intruye a los intrusivos terciarios del Complejo Intrusivo Fortuna (pre-minerales) y a la Granodiorita Elena de edad triásica (Figura 1A).

Las alteraciones corresponden a las típicas de un pórfido cuprífero, con un claro halo clorítico, un centro potásico con vetillas tipo EDM, A, B, SGV y SGVCp, una restringida y estructural etapa hidrotermal tardía con vetillas QSCP y QSP (cuarzo - mica blanca) que cortan y se superponen a las alteraciones tardimagmáticas, y una incipiente alteración argílica avanzada asociada a una alteración hidrotermal tardía (Figura 1E).

Respecto a la mineralización hipógena, Radomiro Tomic muestra la típica zonación, en la vertical y en la horizontal, de un pórfido cuprífero, con un núcleo bornítico rodeado por una zona calcopirítica sobre piritita y un halo periférico con un predominio pirítico (Figura 1B). Los límites de estas zonaciones son transicionales, en donde coexisten y se superponen las fases involucradas, así como también, son dislocadas por deformaciones posteriores. Además, el yacimiento desarrolló una importante zona de oxidación (Figura 1C y 1D), con mineralogía principalmente de atacamita, arcillas con cobre y crisocola, que después de casi 25 años de ininterrumpida producción ha sido explotada de manera significativa, prácticamente agotándola, lo cual que dará paso a una etapa de explotación casi exclusiva de sulfuros hipógenos en los próximos años.

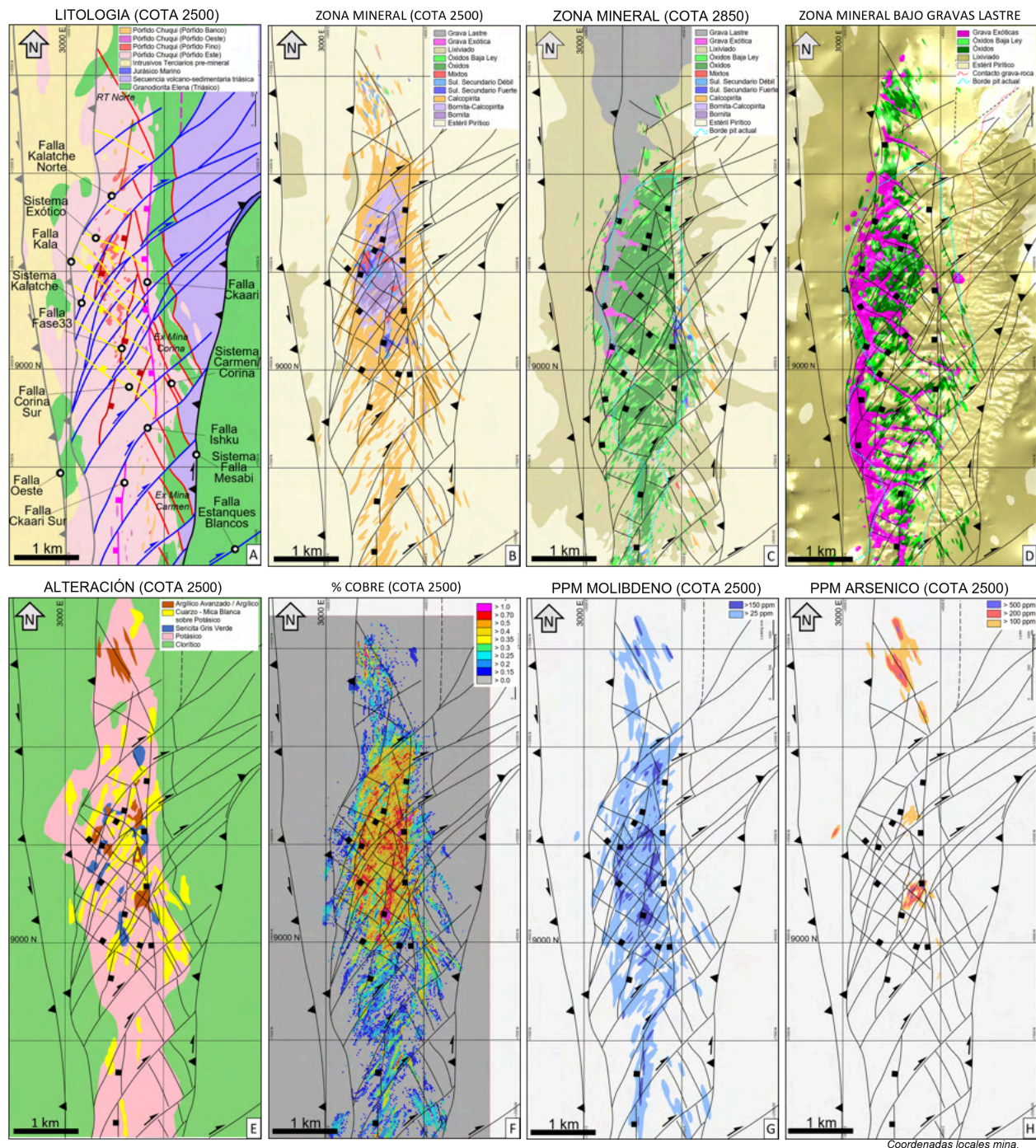


Figura.1. A: Litología, sistemas estructurales y fallas principales, cota 2500; **B:** Zonas minerales, cota 2500; **C:** Zonas minerales, cota 2850; **D:** Zonas minerales bajo gravas lastre; **E:** Alteraciones, cota 2500; **F:** Distribución de Cu, cota 2500; **G:** Distribución de Mo, cota 2500; **H:** Distribución de As, cota 2500.

Evolución Estructural del Yacimiento

En base a los nuevos antecedentes, se propone una nueva evolución estructural del depósito que da una mejor respuesta a la actual distribución y arquitectura espacial de la zona hipógena y supérgena de RT.

Etapas Pre-mineral.

Previo al depósito, el Sistema de Falla Mesabi (NS-NNE) jugaría un rol de borde de cuenca durante el jurásico, limitando la deposición de secuencias mesozoicas al este del sistema.

Por otra parte, distritalmente, y en el borde este de RT, se reconocen estructuras de rumbo NNW, posiblemente asociadas a un sistema preexistentes de estructuras triásicas (Sistema Carmen/Corina) que en el sector de la ex mina Carmen tiene características de milonitización en el contacto entre la Granodiorita Elena y las rocas volcano-sedimentarias triásicas (Figura 1A), indicando una deformación plástica durante la intrusión.

El sistema estructural NNW también se reconoce al norte del yacimiento, en el sector denominado RT Norte. En el yacimiento Chuquicamata, este sistema podría estar representado por la Veta Panizo, ubicada en el extremo noreste de dicho yacimiento y al sur de la Falla Estanques Blancos.

Etapas Sin-mineral.

Regionalmente, y en el distrito, durante el Eoceno medio - Oligoceno temprano se reconoce un evento deformativo dextral/compresivo (Reutter *et al.*, 1993; Lindsay, 1998; Ainol, 2016; Valdivia, 2017; Tomlinson *et al.*, 2018; Jensen *et al.*, 2019) que daría espacio a la intrusión del Pórfido Chuquicamata y la generación del depósito. Esta configuración se ve reflejada en la distribución NE de la mineralización cuprífera hipógena del yacimiento (Sistema Kalatche; ver Figura 1A).

Por otra parte, en Radomiro Tomic, el contacto intrusivo entre el Pórfido Chuqui y la Granodiorita Elena (roca caja de edad triásica) sigue una geometría subparalela a las estructuras NNW señaladas como premineral, indicando una fuerte relación espacial y geométrica con estas discontinuidades. Esta relación se observa claramente en el sector de las ex minas Corina y Carmen, en donde el Pórfido Chuqui tiene características de cuerpos filonianos de orientación NNW que cortan a la Granodiorita Elena y, en menor proporción, a la secuencia triásica, sugiriendo que las estructuras NNW tuvieron un rol fundamental en el emplazamiento de los pórfidos terciarios (Figura 1A). Además, durante este evento deformativo, el Sistema de Falla Mesabi habría sufrido una inversión tectónica (Amilibia *et al.*, 2003), pasando de extensional durante el jurásico (estructura de borde de cuenca) a una actividad dextral/inversa (Valdivia, 2017). Estas relaciones estructurales indicarían que la ocurrencia de la intrusión del Pórfido Chuquicamata en Radomiro Tomic estaría relacionado a la conjunción del Sistema de Falla Mesabi y estructuras NNW triásicas preexistentes del Sistema Carmen/Corina.

Al sur de la Falla Ishku, en un bloque con predominante alteración potásica y escasa alteración fílica, se reconoce una continua zona de mineralización de molibdenita de rumbo NS con leve manteo a W (Figura 1G). Esta estructura correspondería a un "feeder" ubicado en un bloque estructural confinado entre los centros de mineralización de Radomiro Tomic y Chuquicamata, indicando una zona de discontinuidad NS durante el evento tardimagmático, no descartando lo que sería una proto-discontinuidad relacionada al posterior Sistema Falla Oeste.

Al este del depósito, donde el sistema Corina (NNW) se cruza con algunas fallas del Sistema Kalatche, y al oeste de la Falla Ckaari, existen marcadas anomalías de As indicativas de una actividad hidrotermal tardía de carácter epitermal (Figura 1H), reconociéndose una tendencia estructural NE con manteo de 80° al W. Esta mineralización indicaría que estos sistemas estuvieron activos al cierre del evento hidrotermal, así como también, que podría haber una "proto" Falla Ckaari formándose en el contacto entre el Pórfido Chuqui y la Granodiorita Elena. En el sector denominado RT Norte, 2,5 km al norte del centro mineralizado principal de RT, estas anomalías están controladas en un set de vetas de alta sulfuración de actitud N20-30°W/60-70°SW que contienen importantes concentraciones de Cu, Ag, As, Sn y Mo (Figuras 1A, 1F, 1G y 1H).

Etapas Post-mineral (Dextral/Compresivo).

Finalizado el evento hidrotermal, continuaría la deformación dextral/compresiva, pero de manera frágil, indicando un mismo régimen de "stress" pero en una posición más somera, configurando un dúplex dextral. A este evento también se asocian los rechazos dextrales de las fallas Estanques Blancos, Zaragoza, Ishku y Kalatche Norte, algunas de las cuales al parecer convergen a una traza principal del Sistema de Falla Mesabi (Figura 1A). Considerando el contacto entre la secuencia triásica y la Granodiorita Elena, la Falla Ishku tendría un rechazo aparente de 750 m en sentido dextral según una medición realizada en una imagen satelital previa a la operación minera. Un rechazo de similar magnitud también existe entre el extremo sur de la Falla Ckaari y el extremo norte de la Falla Ckaari Sur, no descartándose una conexión entre ambas estructuras al final del evento tardimagmático.

Independientemente de todas estas cinemáticas, el centro del depósito RT no es afectado ni dislocado significativamente por esta deformación dextral frágil, conservándose la zonación clásica de mineralización hipógena (bornita - calcopirita - pirita) y la distribución anular de molibdeno (Figura 1B y 1G).

A este evento frágil se asociaría también el inicio de la formación de la Falla Oeste y su ramal Falla Kala, siendo esta última la que limita por el oeste el bloque mineralizado de Radomiro Tomic y RT Norte.

Etapas Post-mineral (Sinestral/Tensional).

Regionalmente, durante el Mioceno se evidencia un marco de deformación sinestral/compresivo (Reutter *et al.*, 1993, 1996; Lindsay *et al.*, 1995; Lindsay, 1998; Dilles *et al.*, 1997; Tomlinson y Blanco, 1997; Tomlinson *et al.*, 2018) que habría exhumado al depósito facilitando su erosión y oxidación. Sin embargo, en Radomiro Tomic se habría configurado de manera local una zona de régimen extensional que facilitó la generación de estructuras frágiles de carácter normal, probablemente relacionado a un cambio de rumbo de la Falla Oeste.

Entre las estructuras relacionadas a esta etapa destaca el desarrollo de la Falla Ckaari, de actitud NS/75°W, ubicada al este del núcleo mineralizado. El desplazamiento de la Falla Ckaari genera un descenso normal del techo de sulfuros de hasta 70 m en la vertical. Un desplazamiento similar se reconoce a lo largo de la Falla Ckaari Sur, en donde la zona que ocupó el "feeder" NS de mineralización de molibdenita daría origen a una estructura frágil con rechazos similares, vinculando ambas estructuras a un mismo régimen de deformación (Figura 1A).

Asociado a este evento se relacionarían las estructuras NW que controlan paleocanales con mineralización exótica de Cu. Estos paleocanales de dirección SE-NW se interceptan con la Falla Kala principal, creando cuencas de hasta 40 m de potencia con mineralización de cobre exótico. En profundidad, estas fallas controlan la ocurrencia de la mineralización oxidada y secundaria de Cu, configurando una arquitectura de horst y graben dentro de los bloques limitados por estructuras del Sistema Kalatche (Figuras 1A, 1C y 1D). Todas estas estructuras son clasificadas en un nuevo sistema estructural denominado "Sistema Exótico".

También se reconoce un "blanket" de mineralización secundaria limitada por un set de estructuras de rumbo NNE (Falla Fase 33) que bordean los mejores sectores con enriquecimiento secundario del depósito (Figura 1A). Estas estructuras habían sido barreras físicas para la migración de las soluciones y no necesariamente tendrían movimientos significativos en esta etapa.

Finalmente, durante el Mioceno Inferior se reactivan fallas normales relacionadas a la Falla Kala, predominando estructuras con manto al E que cortan el techo de roca y a las gravas con mineralización exótica, con saltos normales de hasta 55 m.

En resumen, los bloques que albergan y controlan la mineralización supérgena del depósito estarían limitados por cuatro estructuras principales, al norte la Falla Kalatche Norte, al sur la Falla Corina Sur, al este la Falla Ckaari y al oeste la Falla Kala y sus ramales normales que cortan a las gravas exóticas.

Conclusiones

En Radomiro Tomic el Pórfido Chuqui se habría emplazado en la conjunción de dos sistemas estructurales preexistentes, el Sistema de Falla Mesabi (NNE) y Sistema Carmen/Corina (NNW), ubicándose el centro de mineralización a 2 km al oeste de una traza del Sistema de Falla Mesabi. Este último, durante el Eoceno medio - Oligoceno temprano habría sufrido una inversión tectónica, pasando de estructuras regionales de borde de cuenta mesozoica a un sistema dextral/inverso.

Los dominios de mineralización hipógena del yacimiento muestran preferentemente estructuras de mineralización con orientación NE (Sistema Kalatche), lo cual concuerda con la dirección de esfuerzos regionales para ese periodo. Además, en un bloque estructural entre la Falla Corina Sur y Falla Estanques Blancos se habría posicionado un "feeder" de orientación NS con mineralización de molibdenita. La ocurrencia de anomalías de As en sectores donde el Sistema Carmen/Corina se cruza con el Sistema Kalatche, y RT Norte, supone que aquellos sistemas estuvieron activos al final del evento hidrotermal.

Posterior a la mineralización hipógena habría continuado el régimen dextral/compresivo, favoreciendo el desarrollo y actividad de estructuras frágiles de rumbo NS como la Falla Oeste y Falla Kala, y estructuras de rumbo NE que cortarían y convergerían en el Sistema de Falla Mesabi.

Durante el mioceno el depósito habría sido exhumado en un régimen sinistral/compresivo, presentando de manera local una configuración extensional que habría reactivado estructuras preexistentes y favorecido el desarrollo de nuevas estructuras frágiles que actualmente controlan la mineralización oxidada y secundaria del yacimiento. A este mismo evento se le asigna la generación de paleocanales de orientación NW que controlan la geometría de mineralización exótica de cobre (Sistema Exótico).

El realce de la importancia del Sistema de Falla Mesabi en la intrusión de las rocas que albergan la mineralización en el Distrito Chuquicamata invita al reconocimiento de su continuidad al oeste de la Falla Oeste, el cual podría estar bajo la Cuenca de Calama o vinculado con el borde occidental de Sierra Limón Verde.

Palabras Clave: Pórfido Cuprífero, Radomiro Tomic, Chuquicamata, Modelo Estructural.

Agradecimientos: Un especial agradecimiento al staff completo de profesionales que han trabajado y trabajan en la captura de información geológica de este importante yacimiento "world class".

Referencias:

- Ainol, S. 2016. Actualización del Modelo Estructural del Yacimiento Radomiro Tomic, R. de Antofagasta, Chile. Memoria de Título. U. de Concepción. 92p.
- Amilibia, A., McClay, K., Skarmeta, J., & Bourdon, E. 2003. Inversion tectonics at Cordillera de Domeyko and its control on giant porphyry copper emplacement; new insights on at-slab subduction kinematics during the Tertiary. GSA V35, p429.
- Camus, F., & Castelli, J. C. 2021. Historia, Exploración & Geología de los Yacimientos Metalíferos de Chile 900-2020. Origo Ed. Stgo. 1339p.
- Jensen, E., González, G., Faulkner, D. R., Cembrano, J., & Mitchell, T. M. 2019. Fault-fluid interaction in porphyry copper hydrothermal systems: Faulted veins in Radomiro Tomic, northern Chile. J. of Struct. Geol. V126, p301-317.
- Lindsay, D. D. 1998. Structural Control and Anisotropy of Mineralization within the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit, northern Chile: Ph.D. thesis, Dalhousie University, 371p.
- Reutter, K. J., Chong, G., & Scheuber, E. 1993. The "West Fissure" and The Precordilleran Fault System of Northern Chile. Andean Geodynamics, Int. Symposium, 3rd, Oxford, UK, ORSTOM. Extended Abs. p237-240.
- Skarmeta, J. 2021. Structural Controls on Alteration Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile. Econ. Geol., V116, no1, p1-28.
- Tomlinson, A., & Blanco, N. 1997. Structural Evolution and Displacement History of the West fault System, Precordillera, Chile: Part 2, Post-mineral history: VIII Con. Geol. Chileno, Afta, V3, p1878-1882.
- Tomlinson, A. J., Blanco, N., Dilles, J. H., Maksaev, V., & Ladino, M. 2018. Carta Calama, Región de Antofagasta. SERNAGEOMIN, Serie Geología Básica N199. Stgo.
- Valdivia, L. 2017. Estudio Geológico Estructural de la Zona de Cizalle Este, Yacimiento Chuquicamata, Norte de Chile. Memoria de Título. U. Católica del Norte, Afta, Chile. 131p.
- Virmond, A. & Chelle-Michou, C. 2022. La petrocronología del circón como herramienta de investigación de los sistemas de pórfidos de cobre. Department of Earth Sciences, ETH Zürich. Inédito. 2p.

Génesis de depósitos minerales de Cu y Au de la Franja Metalogénica Cretácica de Chile Central: Distrito Minero Tiltill

Rocío Rudloff Del Villar¹, Andrés Pavez¹, Carlos Marquardt¹⁻², José Joaquín Jara², Pedro Cordeiro²

(1) GEO-3 EIRL, Servicios de Geología, Geofísica y Geomática, Santa Rosa 3040 PC 15 Condominio Santa Rosa Lampa, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, DIM y/o DIEG, Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

A lo largo de la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales se han descrito depósitos de tipo IOCG, IOA, estratoligados de Cu-(Ag) y pórfidos cupríferos, los cuales se asocian a las franjas metalogénicas desarrolladas en los períodos Jurásico y Cretácico. Durante gran parte de este período la placa sudamericana estuvo sometida a un régimen tectónico extensional a transtensional que a partir de la transición del Cretácico Inferior al Superior cambia a uno predominantemente transpresional a compresional. Este estudio se enmarca en la línea de investigación que busca entender el contexto geológico regional e inferir la génesis de sus depósitos minerales y la continuidad a lo largo de las franjas metalogénicas mencionadas. El objetivo de este trabajo es estudiar la geología del Distrito Minero Tiltill, comprender la geología de los cuerpos mineralizados de origen magmático-hidrotermal más característicos, sus distintas etapas de alteración y mineralización, y la relación espacial y temporal de estos. La metodología utilizada para ello consiste en: (1) mapeo geológico del distrito, de minas y de sondajes, (2) análisis geoquímicos y mineralógicos de muestras de los cuerpos mineralizados, (3) elaboración de modelos geológicos 3D y (4) confección de tablas paragenéticas de los depósitos más característicos del distrito. Se propone que estos depósitos minerales están genéticamente relacionados con la evolución tardimagmática del Plutón Caleu (~94 Ma) y que las etapas de alteración hidrotermal reconocidas en la mayoría de estos son: 1) alteración potásica temprana, de baja ley; 2) alteración albíta-actinolita intermedia, estéril; 3) alteración sericitica y clorita-epidota con mineralización de pirita-calcopirita (menor bornita), cuarzo-hematita (especularita), turmalina, y en ocasiones magnetita; y 4) alteración tardía de calcita-cuarzo, estéril. Los resultados indican que en este distrito ocurre un tipo de depósito mineral de origen magmático-hidrotermal de tipo IOCG, principalmente en cuerpos vetiformes y brechas con contenidos de Au, Cu y Fe asociados a sulfuros, hematita y cuarzo.

Palabras Clave: Franja Metalogénica Cretácica Au-Cu, IOCG, Sistema Magmático-Hidrotermal, Cordillera de la Costa de los Andes Centrales

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el Proyecto FIC-Regional Metropolitano 2017 (N°10), la Pontificia Universidad Católica y por la empresa GEO-3 EIRL.

Referencias:

- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*, 81 (October 2016), 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.016>.
- Boyce, D., Charrier, R., & Fariás, M. (2020). The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39(2), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2019tc005825>.
- Molina, P., Parada, M.A., Gutiérrez, F., Ma, Ch., Li, J., Yuanyuan, L., Reich, R., & Aravena, A. (2015). Protracted late magmatic stage of the Caleu pluton (central Chile) as a consequence of heat redistribution by dike: Insights from zircon data and thermal modeling. *Lithos*, 227, 255–268, ISSN 0024-4937. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.008>.
- Richards, J. P., López, G. P., Zhu, J. J., Creaser, R. A., Locock, A. J., & Mumin, A. H. (2017). Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with cretaceous porphyry Cu ± Mo ± Au and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in northern Chile. *Economic Geology*, 112(2), 295–318. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.295>.
- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787–812. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>.
- Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). Área Tiltill-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, No.11, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.

Superimposed deformations on the 'manto-type' Cretaceous mineralization, Punitaqui district, coastal central Chile

Jorge Skarmeta Magri¹, Gabriel Figueroa¹, Gerardo Villarroel¹

(1) Consultor Independiente

Introduction

The area between Punitaqui and Ovalle (Fig. 1) forms part of a prolific Cu-Au mineralized district within the Cretaceous geology of the Coastal Cordillera of central-northern Chile (Camus and Castelli, 2021). It includes a variety of structure-related mineral deposits and occurrences such as, (i) structurally controlled Cu and Cu-Au mineralization, in minor and medium size structures, (ii) Cu manto-type mineralization associated with a regionally extended sedimentary intercalation within a Lower Cretaceous andesitic volcanic sequence (e.g., Zupilocos, Cullana, Cinabrio, San Andres, among several others), (iii) Cu-Au associated with the intrusive contact between granodiorites and the volcano-clastic sequence (e.g., La Verde and La Grande), and (iv) Au associated with veins and dykes along major structural systems within major batholithic intrusions (e.g., Los Mantos, Delirio and Tambo de Oro, Fig. 1).

Detailed field work and cross-section construction, along with thorough geological analyses allowed us to establish that the district underwent several deformations phases whose relative ages with respect to the main manto-type mineralization stage, varied from contraction to extension and back to contraction, all during the Cretaceous. The presence of a partly mineralized stratigraphic marker of regional distribution permitted to unravel a complex deformation history and demonstrated the presence of a mid-Cretaceous extension event that has not been described before in this region.

This paper deals with the current geometry of the Cu manto mineralization resulting after they were subjected to syn and post-mineralization deformation. These events caused a strong extensional fragmentation, that repeated the sequence and distributed the sedimentary intercalations in a ~EW direction, to subsequently, become partially inverted in a contraction deformation phase.

Geology and mineralization

Since the early Jurassic, the mineralization in northern Chile has been strongly influenced by its paleogeographic position on an active subduction plate margin (Mpodozis and Ramos, 1990). Subduction of the Pacific plate under the South American plate created a series of N-trending volcanic arcs and associated back-arc basins. These active volcanic arcs are the loci, to Cu, Au, and Fe, strata-bound, porphyries and epithermal style orebodies (Sillitoe, 2010), that are intruded by younger, N-trending, Mezo-Cenozoic batholiths (Emparan and Pineda, in edition).

In the Punitaqui-Ovalle region, the volcanic-arc-derived products are represented by a sequence of lower Cretaceous lavas, conglomerates, andesites (locally pillowed), and andesitic breccias with a shallow marine fossiliferous intercalation comprised of black-gray shales, volcanoclastic sandstones and breccia, conglomerates, and fossiliferous limestones (Estratos de El Reloj, Thomas, 1967; Arqueros Formation, Emparan and Pineda, in edition, Fig. 2). The complete unit is preserved as roof-pendants floating and contained on a dioritic to granodioritic intrusive of 106-92 My (Emparan and Pineda in edition).

The area has been subjected to sequential and superimposed tectonic events, that in a relative age with respect to the mineralization of the sedimentary intercalation are (Fig. 2):

1. Late Jurassic to the early Cretaceous *pre-mineral* stage, associated with the infill of an extensional volcano-sedimentary back-arc basin (Arqueros Formation).
2. Late lower Cretaceous-early upper Cretaceous *syn-mineral 1*, manto-type mineralization, with andesitic dyke and ocoite sill-type intrusions in a contractional regime. Its contractional nature is shown by dominant parallel-to-layering mineralized flat fractures.
3. Late Cretaceous granitic intrusion along with *syn-mineral 2* stage Au vein emplacement.
4. Upper Cretaceous *post-mineral 1*, granite emplacement and uplift-related extension associated with low angle detachment planar faults, stratigraphy rotations, truncations, and displacement of sedimentary intercalations.
5. Tertiary *post-mineral 2*, east-vergent contraction associated with the thrusting of ~ 130 My granites over the Arqueros Formation along the Romeral fault. This contraction phase caused a reverse reactivation on selected extensional low-angle normal faults, especially in the western areas, close to the Romeral fault.

Stratigraphy

The stratigraphy of the Arqueros Formation was defined by Aguirre and Eggert (1965) in the Quebrada Marquesa quadrangle and documented in the Punitaqui area by Emparan and Pineda (in edition) and Thomas (1967). Between Punitaqui and Ovalle is partially exposed and conforms an approximately 500 m of a volcano-sedimentary sequence that from top to bottom is composed of three major units (Fig. 3):

- (i) *Upper breccia unit*. Volcanic sequence composed of polymictic andesite volcanic breccias with subordinated volcanic conglomerates and volcanoclastic sandstone. The majority of the breccia fragments are less than 20 cm, are poorly selected, range from sub-angular to sub-rounded, and show a massive appearance that obscures stratification.

(ii) *Sedimentary unit*. This unit hosts the bulk of the copper mineralization and is composed of interbedded fine to coarse-grained sedimentary rocks with variable amounts of tuffs and tuffs breccias. The sedimentary level is discontinuous and exhibits a very variable thickness and strong lateral facies changes. The tuffaceous rocks include reworked, fine to coarse laminated volcanoclastic fragments with shard relicts.

(iii) *Basal andesites and basalts*. Underneath the sedimentary unit crops a sequence of andesites that are locally intruded by discontinuous ocoite dykes and sills that in places intrude up to the sedimentary unit. Ocoites (plagioclase porphyritic andesites) are composed of 50% well-developed phenocrysts in a fine-grained dark groundmass, with microliths of plagioclase. The plagioclase phenocrysts are greater than 0.5 cm and are oligoclase-andesine in composition. Scapolite and actinolite crystals are commonly altered to sericite-quartz and biotite, and the groundmass is chloritized and biotitized.

Mineralization

The Cinabrio mine and the San Andrés and Cinabrio Norte resources are manto-style copper occurrences within the sedimentary and tuffaceous intercalations in the volcanic units. Mineralization occurs as impregnations, dissemination, and a notorious parallel to layering fabric conformed by fractures, veins, and minor faults that structurally control economic mineralization. Mineralization is extremely variable and believed to be controlled by a multiplicity of factors, including the sedimentary facies, composition and thickness distribution of the sedimentary horizons, and the distribution of the structural conduits that focus on the mineralizing fluids (JDS, 2022). The typical mineral assemblage includes chalcopyrite and bornite and the gangue includes pyrite, calcite, and quartz. Primary sulfide mineralization consists of pyrite, chalcopyrite, and bornite, in which the higher-grade zones contain significant amounts of bornite. Syngenetic pyrite is very common in the sedimentary units, in places replacing fossils.

Structural cross-sections

A series of sections oriented normal to the main structural trends (E-W to E-SE) were constructed to establish the basic geometric boundary conditions required to construct a 3-D mineral model. In areas with further exploration potential, where an infill drilling program was required, the model was refined with the integration and correlation of drill-hole and surface data. One of the major, and unexpected findings, was that the marine sedimentary mineralized horizon, which appears as a single layer in the survey map (Emparan and Pineda, in edition), corresponds to one unit, fault-repeated at least four times. The criteria to decide whether it corresponds to a single, structurally fragmented horizon, or four different sedimentary intercalations were established on field evidence. In the normal-to-strike cross-sections, it was determined that between sedimentary horizons is common to observe fault and/or damage zones with fault rocks and fault traces. This relationship was primarily checked over Cinabrio, where the trace of the San Andrés fault can be observed projecting westwards, towards San Andrés. The San Andrés fault has a c. 30 m damage zone, as intercepted by the development of an access tunnel (Fig. 4). Hence, the San Andres project is the offset part of the Cinabrio deposit, by the San Andres extensional fault.

This San Andrés fault zone was further corroborated in drill holes (Fig. 4). The areal fault reconstruction suggests it dips $< 40^\circ$ W-NW, against the east-dipping stratigraphy. A thorough 3-D correlation of the sedimentary intercalation shows that the extensional faults are discontinuous and coalesce along the strike. They rotate, tilt, and repeat the stratigraphy in a relatively homogeneous north-striking, east-dipping domino-type structural panel, in which the inclination of the stratigraphy opposes that of the faults.

The San Andrés – Cinabrio extensional tectonics model was corroborated eastwards. The sedimentary intercalation was recognized four times moving east, and fault rocks can be observed in most of the inter-spaces. This occurs between Mirador and La Juana, Zupilocos, Israela-Antonia, and La Leona, where the mineral concentration is variable. As mentioned before, the distribution of the mineralization depends on many factors, therefore the selectively mineralized sediments indicate that certain facies (i.e., coarse grained sandstones) and/or distance to feeders were not prone to mineralization.

From a stratigraphical viewpoint, it is suggested that the degree of erosion and uplift increases systematically to the east, where the basal andesites of the Arqueros Formation decrease their thickness and the upper volcanic breccia and sedimentary intercalation do not show. In this zone the andesites and andesite breccia are cut by numerous granitic dykes, derived from the underlying granitic intrusions (Fig. 5). Further to the east, around La Verde Mine (Figs. 1 and 5) the volcanic andesites and breccias crop-up nearly vertical, conforming a sort of mineralized drag folds at the contact with the granites. From this point to the east an uplifted granite domain extends for several kilometers to finally conform to a mirror image of the western structures, in which the intruded volcanics are affected by normal, east-dipping faults, scarcely mineralized. No sediments have been recognized in this area.

The correlation of the sedimentary levels between drill holes in the Cinabrio-San Andrés zone shows that some of the detachment extensional faults had been partially inverted. This implies that a late contractional stage had affected the extended sequence, reactivating, in reverse mode, the larger and best-oriented faults, as it occurs in well-documented reactivated terranes (Reilly et al., 2017, Fig. 6).

Discussion and conclusions

Volcanic-hosted strata-bound, manto-type deposits are characteristic of the first period of Andean evolution during which subduction-related arc magmatism and mineralization took place (Mpodozis and Ramos, 1990). Makshev and Zentilli, (2002) suggest that Chilean manto-type deposits (specifically including Punitaqui) develop coeval, distal, and peripheral to batholithic intrusions. In Punitaqui's case, the age of the mantos is broadly coincident with an uppermost Early Cretaceous batholithic intrusion of ~112 Ma (Emparan and Pineda, in edition); therefore mineralization can be related to mobilized hydrothermal fluids of mixed origin during the emplacement and cooling of the batholith within the Arqueros Formation, in which the copper deposited either by reaction with organic (fossiliferous) matter, pyrite, or cooled/mixed with meteoric fluids away from their heat sources.



Fig.1

Ma	Period/Epoch	Stratigraphical record	Mineral chronology	Local tectonics	Regional tectonics
0	Cenozoic		Post-mineral 2	East-vergent Romeral reverse fault, juxtaposes 130 Ma granites over the Arqueros Formation.	Contraction
66			Post-mineral 1	Granite emplacement and uplift-related extension. Low angle "detachment" planar faults truncate and displace mineralized bodies	Extension
100	Upper Cretaceous	Granitoids, ocoites, andesitic dikes and mineralization	Syn-mineral 2: associated with granitic intrusions and Au mineralization at the intrusive contact. Syn-mineral 2: associated with Dalmacia and Cinabrio Cu mineralization, ocoite and dike emplacement.	Contraction, ocoite intrusion and mineralization. Granitic intrusion (94-112 Ma)	Contraction
145	Lower Cretaceous	Arqueros Formation	Pre-mineral	Extension-related back-arc basin development and infill	Extension

Fig.2

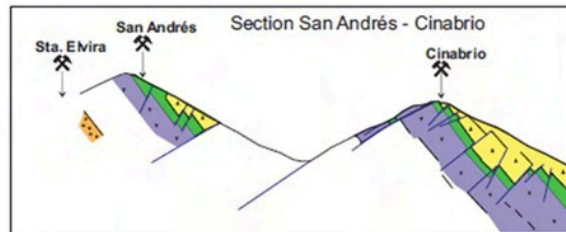


Fig.3

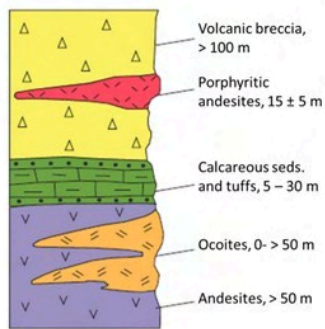


Fig.4

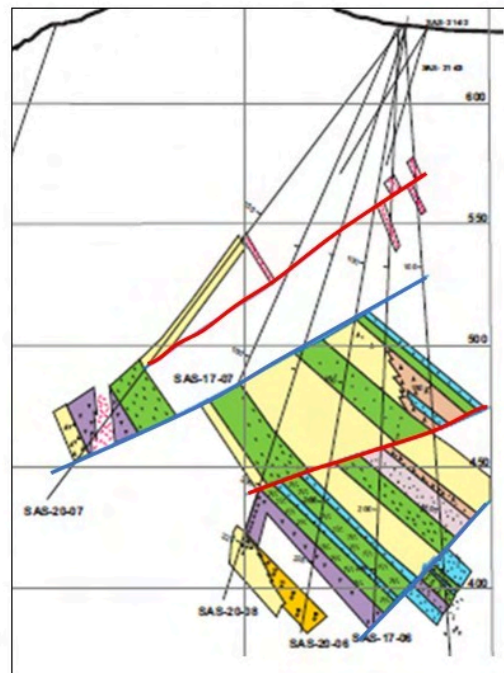


Fig.6

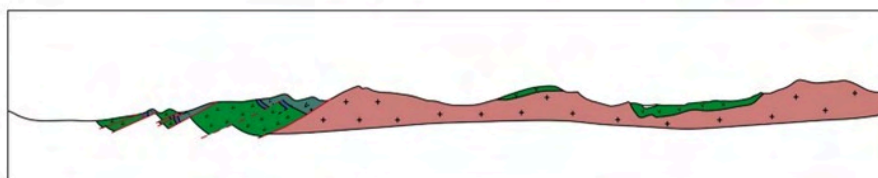


Fig.5

Figure 1 Location map and general geology.

Figure 2. Tectonostratigraphy of the Punitaqui district. Major events in relation with the main mineralization stages.

Figure 3. Local stratigraphy of the Arqueros Formation host rock, in the Cinabrio-San Andres area.

Figure 4. Cinabrio - San Andres cross section

Figure 5. General E-W cross section.

Figure 6. Effects of the post-mineral 2 event on the extended section. In blue, normal detachment faults, in red normal faults subsequently reactivated in reverse mode.

The Punitaqui district has been subjected to superimposed tectonic events, that in the absence of detailed absolute radiometric ages have been organized in stages of relative age with respect to the main manto-type mineralization (Fig. 2).

With respect to the pre and *syn-mineral* events, a first pre-mineral stage can be associated with a late Jurassic to early Cretaceous infill of an extensional volcano-sedimentary back-arc basin, grouped in the Arqueros Formation. This volcanoclastic sequence becomes intruded by a granite batholith of a late lower Cretaceous-early upper Cretaceous age, giving rise to a coeval *syn-mineral 1* stage, in which the sedimentary intercalations become manto-type mineralized, together with the intrusion of andesitic dykes and ocoite sills. The overall tectonic regime was probably a contractional one, as reflected by dominant, parallel-to-layering, mineralized flat fractures. A Late Cretaceous granitic intrusion is associated with abundant large- and small-scale Au veins emplaced within the granites and along pre-existing faults in a late *syn-mineral 2* stage.

The post-mineral stages develop after the mineralization stages and represent the dismembering of the mineralized bodies. The first corresponds to the Upper Cretaceous, *post-mineral 1*, dome-like granite emplacement and uplift-related extension associated with low-angle detachment planar faults, stratigraphy rotations, truncations, and displacement of sedimentary intercalations. This extension deformation phase, recently recognized in this part of Chile, seems to coincide with post-Neocomian extensions (120-110 Ma) documented around the Quebrada Marquesa area, where the Quebrada Marquesa Formation is normal-faulted and unconformably overlain by sandstones and conglomerates with dinosaur bones (Rebolledo, 2019). A late Tertiary contractional deformation phase conforms to the latest event, the post-mineral 2. It corresponds to an east-vergent thrusting of ~ 130 Ma granites over the Arqueros Formation along the Romeral fault (Emparán and Pineda, in edition). This contraction phase is associated with the reverse reactivation of selected extensional low-angle normal faults generated in the previous *post-mineral 1*, especially notorious in the western areas, close to the Romeral fault (Fig. 1).

Keywords: Manto-type mineralization, Arqueros Formation, extensional tectonics.

Acknowledgements: The authors wish to thank Battery Mineral Resources (BMR) for permitting the publication of this work. Xx and zz are thanked for thorough reviews that helped to improve, focus, and clarify the paper.

References:

- Aguirre, L and Eggert, E., 1965. Cuadrángulo Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo, No 15, 92 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- Camus, F., and Castelli, J.C., 2021. Historia Exploración y Geología de los Yacimientos Metalíferos en Chile. Ed. Origo, 1688 p., Santiago, Chile.
- Emparán, C., Pineda, G., in edition, Geología del área Ovalle-Peña Blanca, Región de Coquimbo.
- JDS Energy & Mining Inc, 2022. 43-101 Technical Report for the Punitaqui Copper Mining Complex Project, 541 p.
- Maksaev, V. & Zentilli, M., 2002, Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: An Overview; in Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, Volume 2; PGC Publishing, Adelaide, pp 185-205.
- Mpodozis, C., and Ramos, V., 1990. The Andes of Chile and Argentina. In: Ericksen, G.E., Cañas, M.T., and Reinemund, J.A. (editors), Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, V. 11, pp. 59-90.
- Rebolledo, R. S., 2019, Arquitectura de la Cuenca del Cretácico Inferior y los depósitos asociados a la cuenca de la Formación Arqueros y Quebrada Marquesa, Región de Coquimbo, Chile. Tesis Universidad Andres Bello.
- Reilly, C., Nicol, A., and Walsh, J., 2017. Importance of pre-existing fault size for the evolution of an inverted fault system: Geological Society, London, Special Publications, v. 439, p. 447–463.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems: Economic Geology, v. 105, p. 3–41.
- Thomas, H. 1967. Geología de la Hoja Ovalle, provincia de Coquimbo, escala 1:250.000. Boletín N° 23, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 58 p., y carta geológica.

ÁREA TEMÁTICA 5: GEOCIENCIA APLICADAS



Plan de mitigación y prevención de desastres provocados por aluviones para las localidades de El Melocotón y San Alfonso, cuenca alta del río Maipo, Chile

Carlos Andrade Fuentes¹, Patricio Muñoz Proboste¹, Vanessa Rugiero De Souza¹

(1) AFRY, Departamento de Riesgos Naturales, Los Militares 5001, Piso 9, Las Condes, Santiago, Chile

Entre el 28 y 31 de enero de 2021, un evento climatológico activó las principales quebradas de las localidades de El Melocotón y San Alfonso, comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana. Las precipitaciones del sistema frontal fueron consideradas como un récord histórico para el mes de enero en la capital, alcanzando un total de 99 mm en 3 días (Estación Maipo). A consecuencia de este evento climatológico, una serie de flujos compuestos por una mezcla de rocas, sedimentos, agua y ramas (conocidos comúnmente como aluviones), descendieron desde las montañas hacia los poblados, provocando inundaciones y daños en viviendas, instalaciones públicas y en las principales vías de acceso de ambas localidades.

A ocho meses del evento y por motivo del desastre generado, la DOH solicitó a AFRY la elaboración de un plan de mitigación y prevención de desastres provocados por los aluviones, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático. En este sentido, se realizó un diagnóstico inicial de la problemática y se estimó el déficit actual de medidas de mitigación en ambas localidades, basado principalmente en I) la construcción de una línea base de medidas estructurales y no-estructurales de mitigación existentes, (II) identificación de amenazas actuales y (III) caracterización de sectores actuales y potencialmente vulnerables. Con tal de suplir el déficit, se elaboró una propuesta conceptual de medidas de mitigación de gestión del riesgo, enfocada en los sectores más vulnerables.

Se identificaron algunas medidas estructurales, principalmente asociadas al diseño hidráulico de puentes y a la protección del gasoducto Gas Andes. El Melocotón cuenta con medidas de mitigación estructurales de tipo contención en los cruces de la ruta G-25 con las quebradas La Solana (km 39), Las Cucas (km 40) y La Calchona (km 42). En cambio, en San Alfonso, sólo se identificaron medidas estructurales asociadas a la protección por socavación del gasoducto Gas Andes.

Por otro lado, la identificación de las amenazas actuales permitió clasificar los aluviones, así como comprender su origen, tránsito y zonas de depositación. La terminología técnica consideró lo expuesto en el Proyecto Multinacional Andino (2007). El entendimiento en terreno de los procesos geomorfológicos sustentó la estimación de los volúmenes de sedimentos con periodos de retorno de 10, 30 y 100 años. La metodología de estimación se basó en los trabajos de Gertsch (2009), Lehmann (1999) y Rickenmann (2014), enfoques ya aplicados con éxito en la quebrada de Macul (Amsler et al. 2018; en XV CGCh). En paralelo a la estimación de sedimentos, se calcularon precipitaciones y caudales máximos para los mismos periodos de retorno, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático. Desde un punto de vista práctico, el efecto de cambio climático fue abordado como un aumento de la superficie pluvial debido a la elevación de la isoterma 0°C a los 3.100 m snm (Mardones, 2019).

Finalmente, la identificación de sectores actuales y potencialmente vulnerables reveló una planificación territorial deficiente, en donde la infraestructura, viviendas e incluso instalaciones esenciales están expuestas a la amenaza. En particular, hasta el momento del estudio, no se había establecido un plan de evacuación para San Alfonso, hecho que se vuelve sumamente complejo si consideramos las escasas opciones de áreas seguras y la tendencia de la localidad a seguir creciendo.

Considerando la comprensión de la situación actual, se propuso un plan de medidas de mitigación, tanto estructurales como no-estructurales, para abordar las deficiencias reconocidas. Para El Melocotón, se recomendó realizar ajustes de diseño hidráulico que permitan que los flujos pasen de manera segura por debajo de tres puentes ubicados en las quebradas La Solana, Las Cucas y La Calchona, evitando el desbordamiento. Por otro lado, para San Alfonso, se planteó una recomendación más compleja y ambiciosa que consta de una serie de medidas de mitigación activas, como la estabilización de talud, y pasivas, como la construcción de muros de contención, pozas decantadoras, entre otros, con el objetivo de reducir la posibilidad de generación de erosión y flujos, o en caso de que ocurrieran, asegurar que los flujos avancen de forma segura por la localidad hasta su descarga en el río Maipo. En términos de medidas de mitigación no-estructural, se propuso una actualización del catastro de vulnerabilidad a una escala apropiada para su uso como parámetro de estimación y priorización del riesgo. Asimismo, se recomendó el desarrollo de planes de emergencia y evacuación, junto con campañas de educación y concientización para difundir entre la población los riesgos a los que se enfrentan y promover una actuación preventiva y preparada frente a emergencias.

Palabras Clave: Aluvión, Cajón del Maipo, Vulnerabilidad, Riesgo, Mitigación.

Mapa Multi-Escalar de Peligro de Activación Aluvional de las Subcuencas del Río Maipo

Erik Jensen¹⁻², **Felipe Aron**¹⁻³⁻⁴, Gabriel González¹⁻², Francisca Roldán¹⁻², Alex Zúñiga¹⁻²

(1) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(4) *Ahora en Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Los flujos de detritos gatillados por lluvias, conocidos también como aluviones o flujos aluvionales, son fenómenos naturales que representan una significativa amenaza en regiones de altas pendientes como los Andes en la zona central de Chile. En el país, estos fenómenos ocurren frecuentemente y producen importantes impactos en la sociedad que incluyen: pérdidas económicas asociadas a cortes de la red vial, interrupción del suministro de agua, destrucción total o parcial de casas y, en algunos casos, víctimas fatales. Este trabajo se enfoca en cuantificar la probabilidad de ocurrencia de aluviones o “activación aluvional” a lo largo de las subcuencas subsidiarias del Río Maipo. La cuenca del Río Maipo, que abarca la Región Metropolitana y partes de las regiones de Valparaíso y del Libertador Bernardo O’Higgins, es la zona geográfica de Chile con mayor exposición de la población al impacto por aluviones. En ella se emplaza Santiago, la ciudad con más habitantes en todo el territorio nacional, albergando al 35% de la población nacional. Para una correcta cuantificación del riesgo que estos fenómenos implican, es importante primero dimensionar el peligro como una probabilidad temporal, que se pueda integrar con otras variables como exposición y vulnerabilidad.

Para este estudio se han escogido las cuencas como unidad geográfica de análisis, por la resolución de la información disponible y por la posibilidad de conectarlas con los catastros de eventos pasados. En los catastros, se registran principalmente las zonas afectadas por aluviones, que corresponden a zonas por donde han pasado o donde se ha depositado el material aluvional. Sin embargo, este material proviene de las áreas superiores (“aguas-arriba”) y por lo tanto, las características que condicionan y gatillan estos eventos se deben determinar en estas áreas fuente que se pueden definir como cuencas. Para el análisis las cuencas se definieron sobre una DEM STRMGL1 (~30m/pixel) para drenajes de orden de Strahler 1 a 5, creados con un área mínima de 25 Hás. Para cada cuenca se estimó la susceptibilidad espacial de producir aluviones mediante la ponderación de factores condicionantes. Posteriormente, para estimar las condiciones meteorológicas gatillantes, en cada cuenca se registraron los eventos ocurridos a lo largo de ella, usando un catastro compilado de depósitos aluvionales históricos. Con este registro y el modelo climático de precipitaciones diarias 1979-2020 CR2MET (~5x5km), se obtuvieron las condiciones meteorológicas que gatillaron los aluviones ocurridos, buscando la máxima precipitación diaria modelada sobre la cuenca durante los días previos al evento. Así, se obtuvieron promedios de precipitación diaria necesaria para gatillar aluviones separados por temporada (otoño, invierno y verano). Finalmente, usando el mismo modelo climático, se midió la frecuencia con que estos umbrales han sido superados en los últimos 40 años en cada cuenca definida. Así, considerando una distribución de Poisson, las probabilidades de excedencia se pueden calcular para 1, 10 y 50 años.

Esta aproximación metodológica busca separar los factores condicionantes de las condiciones meteorológicas gatillantes para usarlos de diferente manera al calcular el peligro. Los factores condicionantes se usan para estimar la susceptibilidad del terreno, que es considerada como la probabilidad espacial relativa dado el caso que se generen las condiciones gatillantes. Las condiciones meteorológicas gatillantes se usan para calcular su probabilidad temporal de ocurrencia. La combinación final de estos factores define la peligrosidad buscando a través de la probabilidad de que cada cuenca se active, dado que se cumplan las condiciones gatillantes y que la cuenca sea susceptible a ser activada. Debido a que el modelo climático utilizado (CR2) solo entrega precipitaciones diarias [mm/24h], no es posible analizar los eventos peligrosos en función de su intensidad y duración en horas, como hace en la literatura vigente. Por lo tanto, se espera que las probabilidades pueden estar sobreestimadas, por eventos que pasan los umbrales de precipitación diaria pero no llegan a la intensidad necesaria. Sin embargo, esta propuesta metodológica puede ser fácilmente modificada para mayor precisión a medida que nuevos modelos climáticos sean publicados.

El mapa resultante se presenta ordenando las cuencas por su peligrosidad, dejando las más peligrosas arriba para facilitar la visualización de las zonas más peligrosas dentro de la cuenca del Maipo. Este mapa se puede utilizar como una guía para la planificación urbana y la estimación de riesgo territorial.

Palabras Clave: Probabilidad de aluviones, Cuenca del Río Maipo Chile.

Financiamiento: FONDEF-ID19I10021, ANID, Chile (2020 – 2021).

Susceptibilidad de remociones en masa en las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui

Felipe Baltierra¹, Francisco Castro³, Edilia Jaque², Joaquín Cortés Aranda¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile.

(2) Universidad de Concepción, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile.

(3) Universidad de Concepción, Programa Doctorado en Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

Chile es un país históricamente afectado por procesos de remociones en masa, entendidos como procesos gravitacionales en que una masa de roca, suelo o derrubios son transportados ladera abajo (Cruden, 1991).

Los factores responsables de provocar estos procesos se dividen en factores condicionantes y desencadenantes (Cruden y Varnes, 1996). Los primeros corresponden a las condiciones intrínsecas del terreno (geológicas, morfológicas, entre otras), mientras que los segundos son los responsables externos (precipitaciones, sismos, entre otros). Asimismo, las debilidades estructurales tienen potencial como factor condicionante de remociones en masa (Vick et al., 2020).

El estudio para la prevención de remociones en masa en Chile es urgente, debido a que la expansión urbana se ha desarrollado sobre laderas con pendientes moderadas a fuertes, lo que incide en la ocurrencia de estos procesos. Las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui del Área Metropolitana de Concepción (AMC) han sido afectadas por este tipo de eventos (Naranjo et al., 2006); existen además fallas geológicas importantes, fallas menores cubiertas y lineamientos, que no han sido estudiados desde la perspectiva de las remociones en masa (Vivallos et al., 2010).

Una forma de estudiar estos eventos son los mapas de susceptibilidad, por ello el objetivo central de este trabajo es determinar la susceptibilidad ante remociones en masa en tres comunas del AMC, considerando el rol de las debilidades estructurales como factor condicionante. Para esto, se han recopilado datos de remociones en masa de diversas fuentes bibliográficas, material de prensa pública, además de la revisión de imágenes satelitales, mapas de riesgo y modelos de elevación digital disponibles; sumado a esto, se han realizado diversas salidas a terreno enfocadas en el reconocimiento y validación de la fotointerpretación de remociones en masa.

Con esta información, se ha generado un mapa de susceptibilidad de remociones en masa mediante el método bivariado "Frequency Ratio" (FR), utilizando el software ArcMap 10.5. Este método ha sido ampliamente utilizado para la zonificación de la susceptibilidad de remociones en masa (Tyagi et al., 2022), obteniendo resultados confiables y de mayor precisión que otros métodos (Saadatkhah et al., 2015). FR determina un valor de influencia de cada factor condicionante según los píxeles que ocupan las remociones en masa registradas en cada ráster de las variables condicionantes. En este trabajo se han considerado dentro de dichos condicionantes a la pendiente, aspecto (orientación), lineamientos, redes de drenaje, litología y uso de suelo.

Finalmente, la sumatoria final de la influencia de cada clase dentro de los condicionantes determinará el valor de la susceptibilidad en cada píxel del área de estudio.

Este trabajo está en proceso de obtención del mapa de susceptibilidad final, pero las pruebas hechas hasta el momento han arrojado información relevante: los principales hallazgos encontrados es que las variables de la litología y la pendiente son las que ejercen el mayor peso estadístico a la hora de obtener el mapa de susceptibilidad, siendo las debilidades estructurales de un grado relativamente medio. Se han analizado otras variables, observando en la variable de la topografía una importancia y complemento de los datos entregados por la pendiente. Otro hallazgo es el peso que ejercen los píxeles de las remociones en masa en las diferentes clases de las variables, calculando un peso mayor a una clase con un área pequeña con una cierta cantidad de píxeles de remociones en masa, que una clase con un área más grande con la misma cantidad de píxeles de estos procesos, afectando directamente al resultado final. Resultados preliminares estiman un mayor riesgo de susceptibilidad en el área de Chiguayante, sobre todo en los sectores urbanos en el que los cerros están muy cerca o hay casas emplazadas cerca de laderas; en Concepción en las cercanías de los cerros Caracol, Chacabuco y La Pólvara; y en Hualqui en sectores cercanos a la carretera.

Conclusiones preliminares permiten reconocer que, considerando las remociones en masa inventariadas a la fecha, el principal factor desencadenante en el área de estudio son las precipitaciones, siendo las de mayor registro, además de aún observarse nuevas remociones en masa en los periodos invernales. Se requiere evaluar una cierta cantidad de los factores condicionantes que se usarán para el cálculo final de la susceptibilidad, con el fin de evitar una carga excesiva de información, lo que conlleva a una sobre estimación de la susceptibilidad. Lo anterior siempre dependerá del área que se esté estudiando, pero hay factores básicos que sí deben ser considerados, como la litología y la pendiente.

Palabras Clave: susceptibilidad, remociones en masa, Área Metropolitana de Concepción.

Financiamiento: Fondef "Implementación de una infraestructura de datos geoespacial geomorfológica (i2geo), para la Región del Biobío: una herramienta estandarizada para la planificación territorial" (Edilia Jaque).

Referencias:

- Cruden, D. 1991. A simple definition of landslides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. Vol. 43: 27-29.
- Cruden, D. & Varnes, D. 1996. Landslides: Investigation and mitigation, Chapter 3: Landslides types and processes. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report. N° 247: 36-75.
- Naranjo, J., Arenas, M. & Ramírez, P. 2006. Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la Provincia de Concepción. Servicio Nacional de Geología y Minería. 22 pp. Santiago.
- Saadatkhah, N., Kassim, A. & Lee, L.M. 2015. Susceptibility assessment of shallow landslides in Hulu Kelang area, Kuala Lumpur, Malaysia using analytical hierarchy process and frequency ratio. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 33: 43-57.
- Tyagi, A., Tiwari, R. K. & James, N. 2022. A review on spatial, temporal and magnitude prediction of landslide hazard. Journal of Asian Earth Sciences: X 7, 100099.
- Vick, L.M., Böhme, M., Rouyet, L., Bergh, S.G., Corner, G.D. & Lauknes, R. 2020. Structurally controlled rock slope deformation in northern Norway. Landslides Vol. 17: 1745-1776.
- Vivallos, J., Ramírez, P. & Fonseca, A. 2010. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N°12, 3 mapas en una hoja escalada, Escala 1:20.000. Santiago.

The role of intra-arc strike-slip fault systems on landslide generation at Curarrehue, Central Southern Chilean Andes [CSChA]

Daniel Basualto Alarcón¹, Ivo Fustos-Toribio¹, Esteban Prieto-Santibañez², Jorge E. Romero³, Gonzalo Maragaño-Carmona¹, Julius Jara-muñoz⁴, Elisa Ramírez², Claudia Kunsmann⁵, Amantu Jullian⁶

(1) Universidad de La Frontera [UFRO], Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #01145, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica de Temuco [UCT], Departamento de Geología y Obras Civiles, Ingeniería, Rudecindo Ortega #02950, Temuco, Chile

(3) The University of Manchester, Department of Earth and Environmental Sciences, M14 9PL Oxford Road, Manchester, United Kingdom

(4) University Potsdam, Department of Earth sciences, 14476, Potsdam, Potsdam, Germany

(5) Asesorías y Servicios Geológicos GeoAustral Ltda., Ruta T-350 #2165, Valdivia, Valdivia, Chile

(6) Universidad de Aysén, Obispo Vielmo #62, Coyhaique, Chile

Climate change has increased extreme rainfall events in the Central Southern Andes, favouring slope instabilities and triggering landslides. However, other conditioning factors that control landslides in this region are still poorly constrained. Empirical evidence suggests a link between landslides, active faults, and extreme rainfalls in the study area. For that reason, in this study, we combine multiparametric approaches to elucidate the kinds of landslides present in the area and establish potential triggering mechanisms. This study is centered on examining the tectonic regime of active faults, the mineralogy of hydrothermal alteration in host rocks, and the composition of non-cohesive confined breccia. To achieve the objective of this research, our focus was on: 1. field mapping active faults and landslides related; 2. kinematics analysis to know the current distribution of the strain/stress tectonic regime; 3. outcrop petrological and mineralogical description (host rock fault contact) to define the type of rock and the hydrothermal alteration; 4. geochemical analysis of the fault-gouge to classify the clays present on the core fault, and finally 5. A statistical analysis of rainfall (40-year inventory) from satellite products (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station [CHIRPS]) to find extreme rainfall events (outliers) that could cause landslides. We described 60 outcrops that allowed 166 active fault identifications, and on the other hand, we identified and mapped 42 landslide types (69% rock-fall & 31% rock-avalanche). Our results show that 90.5% of the landslides are linked to active strike-slip faults. The blocks linked with these landslides exhibit microstructures of displacement (striae parallel & slickenfibers) in a phyllosilicate-bearing hydrothermally altered host rock. In the study area, Moreno and Lara (2008) proposed a main first-order NNE master fault, the Reigolil-Pirehueico Fault, considering it a branch of the Liquiñe-Ofqui Fault System. On the other hand, a second and older main structure was proposed by Melnick et al. (2006) for the Mocha-Villarrica Fault Zone, which is dominated by the NW strike, considering an Andean Transverse Fault System. The superposition of these two main structures suggests a complex set of faults. The regional strain results showed that, on the one hand, P and T strain axes are in a preferential cluster, suggesting a predominant ENE-trending shortening and NNW-trending stretching, both axes with a horizontal distribution. On the other hand, the stress axis orientation and stress ratio obtained show that the intra-arc zone is dominated by two different but close stress orientations, and each one of them has a different stress ratio ($\phi = 0.1$ and 0.5). Both results (strain/stress) are consistent with the partitioning from oblique convergence proposed by Pérez-Flores et al. (2016) in the intra-arc domain. The petrological host rock description and mineralogical gouge analysis were conducted on three of the most representative fault/landslide outcrop type combinations. The microscopic description and the XRD-SEM of gouge were consistent with a shallow hydrothermal system that altered the host rock through the active fault zones. The presence of chlorite-epidote-calcite-sericite pervasive substitution of primary minerals and the presence of zeolites (laumontite-phillipsite) are both signs of an active shallow hydrothermal system in the study area (Roquer et al., 2017). Clay minerals like kaolinite, palygorskite, sepiolite, celadonite, vermiculite, corundum phyllite, and clinocllore are found in the breccia, which is consistent with secondary mineralization in a shallow setting. The low temperature at the time of their formation suggests that these phyllosilicates in the fault core formed when hydrothermal fluids moved through a permeable, interconnected network of cracks, caused dissolution and precipitation. The clay minerals found could induce fluid pressure variations by storing or releasing water through hydration-dehydration reactions (Vrolijk 1990), which can further weaken fault zones. The high-water supply in periods of extreme rainfall and the low permeability of the clay matrix are highly suitable for maintaining high pore-fluid pressures. Additional variations in pore-fluid pressure may arise from swelling pressure changes during hydration and dehydration cycles, promoting the triggering of landslides for extreme rainfall in transitional seasons (autumn and spring). In this regard, the presence of clay minerals in fault planes contributes to the generation of landslides in mountain ranges. This interaction fault/landslide is important for geological hazard assessment and landslide monitoring as it is recurrent in CSChA configuration. *

Keywords: Curarrehue landslide fault clay rainfall.

Financing: This work was funded by the Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID); Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) and Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) related to the Postdoctoral Program 2020-2022/No:3200387.

Acknowledgments: We would like to thank the sponsoring institution, Universidad de La Frontera (UFRO) and to Scientific and Technological Biorecuse Nucleus (BIOREN), PhD. Marcela Calabi-Floody and PhD. Karina Godoy.

References:

- [1] Henderson, Iain H.C. Ganerød, Guri V. and Braathen, Alvar., 2010. The relationship between particle characteristics and frictional strength in basal fault breccias: Implications for fault-rock evolution and rockslide susceptibility, *Tectonophysics*, Volume 486, Issues 1–4, 2010, Pages 132-149 ISSN 0040-1951. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.002>.
- [2] Melnick, Daniel & Charlet, Francois & Echler, Helmut & Batist, Marc, 2006. Incipient axial collapse of the Main Cordillera and strain partitioning gradient between the central and Patagonian Andes, Lago Laja, Chile. *Tectonics*. 25. TC5004. DOI: 10.1029/2005TC001918.
- [3] Moreno, H. y Lara, L., 2008, Geología del Área Pucón-Curarrehue, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 115: 36 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- [4] Pérez-Flores, P., J. Cembrano, P. Sánchez-Alfaro, E. Veloso, G. Arancibia and T. Roquer, 2016. Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe Ofqui Fault System, Chile, *Tectonophysics*, 680, 192–210, [doi:10.1016/j.tecto.2016.05.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.016).
- [5] Roquer, T., Arancibia, G., Rowland, J., Iturrieta, P., Morata, D., & Cembrano, J., 2017. Fault-controlled development of shallow hydrothermal systems: Structural and mineralogical insights from the southern Andes. *Geothermics*, 66, 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.12.003>.
- [6] Sánchez, P.; Pérez-Flores, P.; Arancibia, G.; Cembrano, J.; Reich, M., 2013. Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe–Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review*, 55(11), 1384-1400.
- [7] Vrolijk, P., 1990. On the mechanical role of smectite in subduction zones. *Geology*, 18, 703-707.

Precursor soil deformations from Ñisoleufu debris-flow: May 31th 2021: Central Southern Chilean Andes

Daniel A. Basualto Alarcón¹, Ivo Fustos-Toribio², Ardy Gatica², Gonzalo Maragaño-Carmona², Rodrigo Osses², José Luis Palma³

(1) Universidad de La Frontera (UFRO), Dirección de Investigación y Postgrado, Francisco Salazar #01145, Temuco, Chile

(2) Universidad de La Frontera (UFRO), Departamento Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #01145, Temuco, Chile.

(3) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

Landslides have been occurring more frequently as a result of climate change, leading to an increase in episodes of extreme rainfall (1). In general, landslides are more frequent during intense precipitation (2). In Chile, our understanding of rainfall-induced landslides (RIL) remains limited, particularly in relation to the current conditions in hillslopes susceptible to landslides.

In this research, we analyze the deformation patterns leading up to the Ñisoleufu debris-flow event that occurred on May 31st, 2021, in the southern shore of Calafquén Lake, Los Ríos region. To conduct this study, we employed a multi-temporal InSAR approach using Sentinel-1 C-band SAR data. This approach allowed us to generate a time series of deformation preceding the landslide and compare it with daily precipitation records from nearby weather stations and satellite measurements. We integrated this spatial-temporal deformation analysis and rainfall with a laboratory analysis of the physical soil properties to better understand the conditions that could trigger the Ñisoleufu debris-flow event.

The Ñisoleufu mountain area is composed of the North Patagonian Batholith at the base, followed by stratified volcano-sedimentary units, and crowned with morainic deposits (3). Close to the lake, the first two units are covered by two old alluvial fans, whose fronts have been deposited within Calafquén Lake. These alluvial fans consist of unconsolidated sediments characterized by poorly sorted, supported matrix with angular clasts ranging in size from blocks to gravels, without stratification. The detailed features of these old deposits are remarkably similar to the recent debris-flow, suggesting that the 2021 event is not an isolated phenomenon in the area. To study the geomorphological characteristics, we utilized a 12.5 m resolution ALOS PALSAR DEM dataset to generate slope, aspect, and elevation maps. For the delimitation of the debris-flow, we employed the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which exhibits a sharp decrease over landslide areas due to the loss of vegetative cover (118,575 m²). To assess the influence of rainfall, we analyzed data from the meteorological Pucón station (INIA network <https://agrometeorologia.cl/>) and the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) dataset satellite estimates (4) on a daily scale.

From a geological perspective and through laboratory studies, we have been able to provide a comprehensive description of two paleo-soils exposed on the walls of the Ñisoleufu canyon. The results obtained from laboratory analysis of soils S-2 and S-4, including liquid limits (WL), plastic limit (WP), plasticity index (PI), and granulometry, allowed us to classify both soils as: "inorganic elastic silt with sand", according to the Unified Soil Classification System (USCS=MH). Additionally, a Porchet test conducted on the S-4 soil revealed a moderately high infiltration rate of 112.70 mm/hr, resulting in a computed hydraulic conductivity value (k) of 0.00313 cm/sec. This characteristic infiltration rate is commonly observed in soils within this area (5).

The utilization of a significant number of SAR images and the frequent revisits by Sentinel-1 enabled us to acquire a substantial amount of data distributed over time, facilitating the analysis of slope behavior prior to the debris-flow event on May 31, 2021. The time series of Line of Sight (LOS) deformation illustrates the distribution of deformation values at Persistent Scatterers points (PS points), which were compared with the cumulative precipitation recorded between SAR acquisitions from November 2020 to June 2021. The results from Persistent Scatterer Interferometry (PSI) indicate sustained deformation during the pre-event period (ascending-orbit_average=130mm; descending-orbit_average=60 mm), approximately one and a half months before the Ñisoleufu debris flow took place. This coincided with a period of intense precipitation.

The volcanic nature of the soil in the Southern Andes confers both a high infiltration rate and the ability to retain a significant amount of water. On the day the debris flow was triggered, an intense rainfall event fell 159.8 mm of water within a 24-hour period. This, coupled with the steep slope (>30°), led to soil saturation (WL: S-2=150%; S-4=124%) during extreme rainfall, creating favorable conditions for the generation of debris flow.

The nature of debris flows, characterized by slow deformations, aligns well with the capability of InSAR to capture such movements. Consequently, the application of this technique enables the analysis of precursor deformations, aiding in the identification of potential signals for forecasting events, facilitating even the monitoring of isolated or remote areas.

Keywords: Precursor soil deformations, debris-flow, multi-temporal InSAR approach, daily precipitation records.

Financing: This work was partially funded by the Chilean National Agency for Research and Development (ANID) Postdoctoral Program 2020-2022 no. 3200387 and CIVUR-39° "Centro Interactivo Vulcanológico de La Araucanía", project no. FRO2193 of the Desarrollo de Actividades de Interés Nacional (ADAIN), Ministerio de Educación, Gobierno de Chile.

Acknowledgements: GeoAraucanía Group, a university community made up of professionals linked to geosciences, forming part of Universidad de La Frontera (UFRO), Catholic University of Temuco (UCT), and Universidad Mayor.

References:

- (1) Gariano, S. L., and Guzzetti, G. (2016) Landslides in a changing climate, *Earth-Science Reviews*, Volume 162, Pages 227-252, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>.
- (2) Fustos I, Remy D, Abarca-Del-Rio R, Muñoz A (2017) Slow movements observed with in situ and remotesensing techniques in the central zone of Chile. *Int J Remote Sens*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1317944>.
- (3) Rodríguez, C., Pérez, Y., Hugo Roa, Clayton, J., Antinao, J. L., & Duhart, P., Martin, M (1999) Geología del área de Panguipulli-Riñihue, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos No: 10. 1999.
- (4) Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. (2015) The climate hazards of infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- (5) Valle, Susana R., and Carrasco, Jerman (2018). Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions, *CATENA*, Volume 162, 386-395, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.024>.

Análisis de Susceptibilidad a remociones en masa en el área de Patagonia Verde, X Región de los Lagos, Chile

Hugo Bertín Kaimen¹⁻²

(1) Universidad Austral de Chile, Geología, Ciencias, Independencia 631, Valdivia, Chile

(2) Centro de Estudios Científicos, Glaciología y Cambio Climático, Arturo Prat 514, Valdivia, Chile

El presente trabajo desarrolla un análisis de susceptibilidad a remociones en masa del área de Patagonia Verde (Schilling et al., 2019) que corresponde a las comunas de Cochamó, Hualaihué, Chaitén, Futaleufú y Palena, de la Región de los Lagos. Este estudio se ha realizado modificando levemente la primera parte de la metodología propuesta por Marisol Lara (Lara, 2007), en la cual se asignan pesos ponderados a los factores condicionantes de incidencia primaria de remociones en masa. A dicha metodología se le adicionó y modificó ítems de factores condicionantes como los glaciares y el encajonamiento en valles con alta pendiente. Los factores condicionantes utilizados para la evaluación de susceptibilidad fueron: litología, contactos litológicos, fallas, pendientes, exposición/aspecto, encajonamiento del canal de drenaje, cobertura vegetal, glaciares y antecedentes (catastro remociones en masa). Se analizaron 3 tipos de remociones en masa: caída de rocas, deslizamientos y flujos. Para cada tipo de evento se definieron los factores condicionantes asociados, y se les asignó el correspondiente porcentaje de peso, calibrando y validando estas ponderaciones en base al registro histórico de remociones en masa. Finalmente se realizó la sumatoria con la cual se obtuvieron los índices de susceptibilidad a remociones en masa. Estos índices pueden variar entre 0 y 100%, siendo 100 el escenario hipotético más propicio para desencadenar una remoción en masa. Para efectos de este estudio, índices de susceptibilidad mayores a 50% se consideran altos y se recomiendan para evaluaciones posteriores. Todo el proceso, de análisis a resultados, se ha llevado a cabo en el Software Qgis versión 3.22.13 Biatowieza con imágenes ALOS PALSAR de 12,5 metros de resolución, obtenidas a través de la plataforma de Alaska Satellite Facility (ASF). Se han creado shapes para cada factor condicionante con sus respectivos valores específicos (porcentajes de peso), que luego fueron convertidos a ráster. Mediante la herramienta de calculadora ráster se llevaron a cabo tres sumatorias (álgebra de ráster con 12,5 m. de resolución) para así generar los mapas de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa. Los resultados se trabajaron en escala 1:500.000, dividiendo el mapa general en 3 zonas para cada tipo de remoción en remoción en masa (Norte, Centro y Sur). Estos muestran una gran cantidad de áreas y puntos con altos índices de susceptibilidad, que fueron evaluados para la generación de cada tipo de remoción en masa: caída de rocas, deslizamientos y flujos. Siendo las remociones en masa del tipo flujos las que cubren mayor porcentaje del mapa.

Palabras Clave: Landslide, análisis susceptibilidad remociones en masa, Patagonia.

Financiamiento: Centro de estudios Científicos, Departamento de Glaciología y cambio climático.

Agradecimientos: Al Centro de Estudios Científicos; a Gaspar Cid, patrocinante y guía de este trabajo; a Rodrigo, Camilo, Andy y a todo el equipo de Glaciología y cambio climático; a Pablo Iribarren, co-patrocinante.

Referencias:

- Duhart, P., Sepúlveda, V., Garrido, N., Mella, M., Quiroz, D., Fernández, J., Moreno, H., Hermosilla, G., 2019. The Santa Lucía landslide disaster, Chaitén-Chile: origin and effects.
- Lara, M., 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. SANTIAGO: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Muñoz, E.M., 2020. Remociones en Masa. Casos emblemáticos en la región de Aysén, in: Chile Cambiando. Revisitando La Geografía Regional de Wolfgang Weischet. Universidad Austral de Chile, pp. 403–406.
- Schilling, M., Contreras, F., Martínez, T., Beroiza, C., Amthauer, J., Rovira, A., Contreras, P., Duhart, P., Mella, M., Quiroz, D., Roa, H., Vásquez, R., Garrido, N., Gho, R., Amigo, A., 2018. Geoturismo en Patagonia Verde: geodiversidad, patrimonio geológico y geoconservación para el desarrollo local en el sur de Chile.

Factores condicionantes y gatillantes de remociones en masa cosísmicas en suelos piroclásticos en los Andes del Sur (39° S)

Daniel Vásquez-Antipán¹⁻², Ivo Fustos-Toribio², **Álvaro Bravo**³, José Riffo², Ana Cortez-Díaz³, Jonathan Lazo¹

(1) Universidad de La Frontera, Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Temuco, Chile

(2) Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Temuco, Chile

(3) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Temuco, Chile

Los suelos piroclásticos plantean importantes problemas medioambientales, destacando los casos de estabilidad de laderas ante cargas sísmicas. Esto implica que las remociones en masa cosísmicas en suelos piroclásticos sean uno de los eventos geológicos de mayor amenaza en la Zona Volcánica Sur de los Andes. En el sur de Chile, aunque grandes remociones en masa gatilladas por terremotos históricos han afectado a estos suelos, todavía no se comprende su potencial respuesta ante futuros sismos. Con el objetivo de identificar los principales factores condicionantes y gatillantes en la generación de remociones en masa cosísmicas, se analizó el área en torno al Complejo Volcánico Mocho-Choshuencho, uno de los volcanes más productivos y explosivos en Chile. El enfoque metodológico incluyó la evaluación de factores geológicos, geotécnicos y dinámicos, mediante estudios de campo, análisis de laboratorio, técnicas de teledetección y modelación numérica.

Las condiciones geológicas indican que las remociones en masa se concentran en laderas cubiertas por múltiples erupciones explosivas que abarcan un periodo de >12 ka, por lo que presentan una importante meteorización y contenido de halloysita. La meteorización, al debilitar la estructura del suelo, lo vuelve más propenso a la erosión y la inestabilidad, mientras que la halloysita, como mineral arcilloso, aumenta la capacidad de retención de agua del suelo, lo que puede reducir su resistencia mecánica. La deformación detectada con percepción remota estaría asociada a las precipitaciones estacionales, las cuales aumentarían la presión de poros de agua y reducirían la resistencia al corte del suelo, promoviendo reptación. Un rango de >9 ka podría ser un intervalo de tiempo razonable para la formación de halloysita en áreas como la Zona Volcánica Sur. Por lo tanto, una gran parte de los suelos piroclásticos postglaciales en el sur de Chile tendría un potencial mal comportamiento sísmico.

La baja velocidad de propagación de ondas de corte en los suelos piroclásticos del área sugiere una gran capacidad de amplificación local de las ondas sísmicas. Esto se observó en simulaciones numéricas de terremotos de subducción y cortical chilenos, donde se encontraron patrones de deformación heterogéneos en la mayoría de las laderas. Las zonas de mayor aceleración se concentran en las crestas y se extienden hacia el sector medio de las pendientes, lo que sugiere efectos de amplificación topográfica. Estos resultados fueron comparados con la distribución de áreas afectadas por remociones en masa durante los terremotos de Valdivia de 1960 (9,5 Mw) y Neltume de 2021 (4,8 Mw) mostrando una alta correlación espacial. Además, se destaca que las respuestas del suelo varían según las características del evento sísmico, así como las condiciones geológicas, geotécnicas y geomorfológicas de la ladera. Concluimos que la compleja topografía del área alrededor del Complejo Volcánico Mocho-Choshuencho, con crestas y valles cubiertos de suelos piroclásticos, es uno de los principales factores responsables de la amplificación local. Por lo tanto, es crucial utilizar estas características para identificar las áreas propensas a remociones en masa en la Zona Volcánica Sur de los Andes. Este estudio abre las puertas para mejorar la evaluación de los peligros geológicos y contribuir a generar planes de mitigación que reduzcan el impacto de las remociones en masa en la población, la infraestructura y los recursos naturales en el sur de Chile.

Palabras Clave: suelos piroclásticos, terremotos, remociones en masa.

Financiamiento: Universidad de la Frontera financió el programa de magíster de Daniel Vásquez. Proyecto FONDECYT 11180500 financió las campañas de terreno y diversos análisis que fueron necesarios durante la investigación.

Agradecimientos: Agradecemos el apoyo de Fundación Huilo-Huilo, Daniel Basualto, Mario Pooley, don Gonzalo Cortez, Wilson Benavides y Ardy Gatica. A Sergio Ruiz por facilitar los datos del terremoto del Maule-2010.

Referencias:

- González, C., 2012. Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico. Master's thesis, Univ. Chile, Chile, 223 pp.
- Hosobuchi, M.N., Chigira, M., Lim, C., Komoo, I., 2021. Geological history controlling the debris avalanches of pyroclastic fall deposits induced by the 2009 Padang earthquake, Indonesia: The sequential influences of pumice fall, weathering, and slope undercut. Eng. Geol. 287. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106104>.
- Rawson, H., Naranjo, J.A., Smith, V.C., Fontijn, K., Pyle, D.M., Mather, T.A., Moreno, H., 2015. The frequency and magnitude of post-glacial explosive eruptions at Volcán Mocho-Choshuencho, southern Chile. J. Volcanol. Geotherm. Res. 299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.04.003>.
- Veblen, T.T., Ashton, D.H., 1978. Catastrophic influences on the vegetation of the Valdivian Andes, Chile. Vegetatio 36. <https://doi.org/10.1007/BF02342598>.
- Wright, C., Mella, A., 1963. Modifications to the soil pattern of South-Central Chile resulting from seismic and associated phenomena during the period May to August 1960. Bull. Seismol. Soc. Am. 53.

Remociones en masa en contextos urbanos de la zona costera del Centro Sur de Chile

Francisco Castro Venegas¹, Edilia Jaque Castillo², Alfonso Fernández Rivera²

(1) Universidad de Concepción, Programa de Doctorado en Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Concepción, Chile

Chile es un país expuesto a multiamenazas como las remociones en masa. La zona centro-sur de Chile (35-38°S) se ve particularmente afectada debido a la interacción de múltiples factores que condicionan la ocurrencia de estos procesos, tales como litología, debilidades estructurales, características de los suelos, incendios forestales, actividad antrópica, entre otros. Dentro de esta región, el Área Metropolitana de Concepción (AMC) combina condiciones que favorecen la ocurrencia de deslizamientos, flujos y caídas provocadas por fuertes lluvias (Mardones et al., 2004; Fustos et al., 2017; López et al., 2021). Por lo tanto, es necesario zonificar las áreas de riesgo para una mejor planificación. A pesar de que la zonificación de estas amenazas está integrada en los Planes Reguladores Comunales, en Chile no existe una metodología estandarizada para ello (Espinoza, 2013). Muchas bases de datos actuales ofrecen pocos detalles sobre eventos individuales, ya que registran sólo como coordenadas discretas; rara vez se indica el volumen transportado y/o la superficie afectada, hay imprecisiones en la fecha de ocurrencia o faltan eventos por registrar. Estos datos son fundamentales para una apropiada zonificación de susceptibilidad, peligro y riesgo de remociones en masa (Tyagi et al., 2022).

Esta investigación se centra en las remociones en masa desencadenadas por precipitaciones, por lo que el objetivo de este estudio es comprender qué condiciones provocan una mayor probabilidad de ocurrencia de estos procesos y qué umbrales de precipitación los desencadenan. Para lograr este objetivo se están inventariando detalladamente las remociones de la zona entre los años 1990 y 2022, incluyendo aspectos como ubicación, tipo de movimiento, material transportado, unidad geológica, actividad antrópica asociada, fecha de ocurrencia, factor desencadenante y su magnitud, área y volumen, entre otras. Esta geodatabase complementa y expande la información proveniente del catastro de SERNAGEOMIN, que a la fecha representa el estándar de-facto en Chile, con nuevos registros de: Datos históricos (prensa local y reportes de municipios); (b) Fotointerpretación de imágenes satelitales (disponibles en Google Earth Pro, ortofotografías) y Modelos Digitales de Elevación derivados de levantamientos LiDAR; y (c) caracterización en terreno de depósitos recientes. A partir de esto, se busca analizar el rol de la lluvia antecedente y la duración de los eventos hidrometeorológicos que detonan remociones en masa, utilizando registros instrumentales disponibles en el área de estudio.

A la fecha se han registrado más de 1.000 procesos de remociones en masa en la zona, donde los principales tipos de movimientos corresponden a deslizamientos (76%), caídas (15%) y flujos (7%). Además, en 720 eventos se identificó el factor desencadenante, siendo los factores principales las precipitaciones (78,6%) y los terremotos (9,7%). Considerando las unidades geológicas del área de estudio, las rocas del Basamento Metamórfico concentran más del 30% del total de registros, luego los granitoides con un 29,6%, seguido de las Secuencias Mesozoicas (Fm. Santa Juana y Fm. Quiriquina) que superan el 18%, las Secuencias Paleógenas (Fm. Cosmito y Fm. Curanilahue) con un 12% y las unidades Neógenas-Cuaternarias con casi un 7%. Se detecta que los deslizamientos y flujos se producen principalmente en invierno, con mayor concentración en junio, julio, agosto, e incluso en septiembre. La base de datos también muestra una acumulación de eventos en el mes de febrero, que corresponden a deslizamientos cosísmicos asociados al terremoto del Maule (27 de febrero de 2010, Mw=8,8).

Este estudio ha permitido analizar la relación entre la ocurrencia de estos flujos y deslizamientos, la lluvia antecedente acumulada (E) y la duración del evento hidrometeorológico (D), siguiendo las directrices que diversos autores mencionan (Guzzetti et al., 2008; Huang et al., 2022). Los resultados preliminares muestran cierta relación entre la duración del evento meteorológico y la precipitación acumulada para desencadenar el evento. Sin embargo, la lluvia antecedente o la precipitación acumulada en un evento meteorológico no es lo único que controla los deslizamientos y flujos en el AMC, quedando demostrada la necesidad de explorar la posibilidad de otros umbrales acotando cierta información respecto a los factores condicionantes, como la geología y geomorfología.

En una etapa posterior del trabajo se pretende determinar zonas que podrían ser potenciales áreas de ocurrencia de remociones en masa detonadas por precipitaciones tanto temporal como espacialmente, mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático.

Palabras Clave: Remociones en masa, Landslides, Landslide Inventory, Umbrales de precipitación, Rainfall Thresholds.

Financiamiento: -Proyecto VRID UdeC "Análisis de Multiamenazas en Contextos Metropolitanos Costeros: Aportes para la Construcción de Resiliencia en Escenarios de Cambio Climático", COD: 2021000383MUL. -Proyecto IDEA I+D 2022 "Implementación de una infraestructura de datos geoespacial geomorfológica (i2geo), para la Región del Biobío: una herramienta estandarizada para la planificación territorial", COD: ID22110334. -Proyecto UCO 1866, Dirección de Postgrado, Universidad de Concepción. -Beca ANID de Doctorado Nacional, Folio: 21211410.

Agradecimientos: Se agradece a los estudiantes del proyecto Multiamenazas Biobío (<https://www.multiamenazasbiobio.cl/>) por nutrir la base de datos y a los vecinos del AMC por enriquecer nuestra investigación.

Referencias:

- Espinoza, C. (2013). Propuesta metodológica para establecer áreas de riesgo por remoción en masa, Chile. Cuadernos de Geografía- Revista Colombiana de Geografía. Vol. 22, n°2, pp. 145-169. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v22n2.37023>.
- Fustos, I., Remy, D., Abarca-Del-Río, R. & Muñoz, A. (2017). Slow movements observed with in situ and remote-sensing techniques in the central zone of Chile, International Journal of Remote Sensing, 38:24, 7514-7530. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1317944>.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. et al. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 5, 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>.
- Huang F., Chen J., Liu W., Huang J., Hong H. & Chen W. (2022). Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold. Geomorphology, 408, Article 108236. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108236>.
- López, P., Qüense, J., Henríquez, C. & Martínez, C. (2021). Applicability of spatial prediction models for landslide susceptibility in land-use zoning instruments: a guideline in a coastal settlement in south-central Chile, Geocarto International. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1939440>.
- Mardones, M., Echeverría, F. & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. Invest Geogr Chile. 38:1-24.
- Tyagi, A., Tiwari, R. & James, N. (2022). A review on spatial, temporal and magnitude prediction of landslide hazard, Journal of Asian Earth Sciences: X, Volume 7, 100099, ISSN 2590-0560, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100099>.

Proyección futura ante remociones en masa inducidas por lluvia bajo diferentes Modelos Climáticos Regionales en la zona Central y Sur de Chile

Ivo Janos Fustos-Toribio¹, Rodrigo Marinao¹⁻², Gonzalo Maragaño Carmona¹⁻², Mauricio Zambrano-Bigiarini¹

(1) Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

(2) Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

El cambio climático tiene la capacidad de modificar la frecuencia y la intensidad de las lluvias extremas en todo el mundo, lo que a su vez ocasiona cambios en la frecuencia y ubicación de las remociones en masa (RM). En los últimos años, los Andes del Sur han experimentado un aumento constante en los eventos de RM, los cuales han causado pérdidas significativas tanto en vidas humanas como en términos económicos. A pesar de esta situación, actualmente no existe un modelo que permita evaluar de manera adecuada el peligro futuro de estos eventos ni su impacto en el territorio.

Este estudio se propone implementar tres modelos bayesianos que serán influenciados por las condiciones geomorfológicas y los datos de precipitación recopilados durante periodos con y sin RM entre los 33°S hasta los 42°S a una resolución espacial de 1 km. Para llevar a cabo este análisis, se utilizará un catálogo detallado que incluye información sobre fechas y ubicaciones geográficas. El modelo fue validado mediante un análisis *Receiver Operating Characteristic* (ROC), arrojando un área bajo la curva (AUC) superior a 0.8. Con base en estos resultados, se aplicó el mismo modelo a escala mensual utilizando datos de cinco Modelos Climáticos Regionales (RCM) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados de la Fase 6 (CMIP6). Se consideró el escenario conservador (RCP 8,5) para evaluar las posibles variaciones temporales en la ocurrencia de RM.

En general, los resultados indican que la extensión de terreno propensa a RM y la frecuencia de las lluvias experimentarán cambios significativos a lo largo de las décadas. Se espera un aumento en estas variables a finales de la década de 2030, seguido de una disminución en el área afectada, para luego volver a aumentar a principios de la década de 2060. No obstante, se identificaron áreas específicas, especialmente en las proximidades del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, donde se espera un incremento en la frecuencia de RM. En consecuencia, se recomienda priorizar estrategias de mitigación y preparación para la década del 2030.

Este trabajo contribuye a una mejor comprensión de los posibles impactos del cambio climático en el riesgo ante RM en los Andes del Sur, y representa un primer paso hacia una evaluación cuantitativa a nivel nacional de la exposición y el riesgo asociados a estos tipos de eventos en un marco de cambio climático.

Palabras Clave: Landslide, Climate change, Bayesian Analysis.

Financiamiento: Fondecyt 1230792.

Summer landslide outbreaks in the Andes of central Chile

Rene Garreaud¹⁻², Francisca Roldán³⁻⁴, Gabriel Gonzalez³⁻⁴, Walter Roldán⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, FCFM, Santiago, Chile

(2) Center for Climate and Resilience Research (CR2), Santiago, Chile

(3) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, Chile

(4) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(5) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ingeniería Civil, Antofagasta, Chile

Rainfall-induced landslides are geological events with a detrimental impact on society, economy and the natural environment, as well as threatening the life and property of the people (1). Intense summer or winter rainfall is the main trigger of debris flows in the Andes sectors of central Chile and adjacent Argentina (2). In this sector, rainfall exhibits marked seasonality caused by changes in the intensity and positioning of the subtropical Pacific anticyclone. Precipitation events caused by frontal systems and atmospheric rivers sourced in the Pacific are dominant in winter but truly exceptional in summer. Consistently, rain is nearly absent over the coast and interior valleys from December to February. Summertime precipitation increases toward higher elevations caused by isolated, convective storms fed by moisture sourced over the interior of the continent in connection with the South American Monsoon system. Although summer storms account for <10% of the annual total over the high terrain of the central Andes, they are problematic because they contain heavily precipitating cores and rainfall occur at altitudes of up to 4,000 m a.s.l., far exceeding the snow isotherm in winter (~2,300 m a.s.l. (3)), potentially being more apt to trigger landslides on the abrupt slopes of the Andes (4), due to the increase in the rainwater catchment area of the basins or hillsides.

Fourteen landslide outbreaks -multiday events in which multiple flow-type landslides occur- have been reported in summer since 1980 in the Andes of Valparaíso, Metropolitan and O'Higgins regions. These summer events resulted in road cuts, infrastructure damage, population isolation and, in the most extreme cases, thousands of homes damaged and/or destroyed, with a total of 38 human fatalities and 14 missing bodies. Although landslides originate in the upper parts of the Andean basins the flows are channeled in the lower areas of these basins coinciding with urban areas. In addition, the landslides often result in sudden and extreme increases in water river turbidity, jeopardizing the potable water provision for several millions of inhabitants downstream in central Chile.

Here we offer a comprehensive analysis of three recent landslides outbreaks (25-26 Feb 2017, 29-31 Jan 2021 and 5-9 Jan 2023) addressing the large-scale atmospheric context, the regional-scale meteorological conditions and the micro-basin scale landslide distribution. The Feb 2017 and Jan 2023 events were caused by convective storms atop the Andes but with different moisture sources that caused a shift in the precipitation distribution over the mountains. In contrast, the event in late January 2021 was more akin to a winter storm with a mix of stable and convective precipitation encompassing a broader region (5). All three cases resulted in substantial social impact with 8 human fatalities and 1 missing body in the case of 2017.

Of particular interest is the association between the meteorological trigger and the spatial distribution of flow-type landslides, mediated by the conditioning factors that define terrain susceptibility. A very low density of rain gauges and the lack of weather radars hinders a reliable estimate of the rainfall threshold triggering the landslides. Furthermore, non-systematic, under-sampled inventories of landslides have limited our capacity to quantify the rainfall-landslide association over the Andes. Here we partially abated such problems by considering two datasets: the lightning distribution from 2012 onwards, including thousands of individual strokes over the central Andes, and a novel landslide inventory developed on the basis of Sentinel 2-A multispectral and multitemporal images analysis and calibrated by field work, including hundreds of landslides in our study region. Activated micro-basins tend to be collocated with lightning clusters, with a good agreement in the 2017 and 2023 cases, consistent with their more convective nature. The lack of agreement (e.g., areas with lightning but no landslides) may signal a lower susceptibility of the terrain to produce landslides or non-precipitating convective storms. Thus, besides illuminating the fine scale structure of the storms and ensuing landslides, the combination of these datasets may be useful for developing landslide risk models and landslide nowcast for operational purposes.

Keywords: Landslides, Rainfall, Summer storms, Flow, Lightning.

Financing: FONDAP / ANID 1522A0001 (Center for Climate and Resilience Research, CR2) FONDAP / ANID 1522A0005 (CIGIDEN) FONDECYT / ANID Regular 1211412ANID 21221875 (Becas de Doctorado Nacional año 2022).

References:

- (1) Shen, C., & Xue, S. (2018). Displacement prediction of rainfall-induced landslide based on machine learning. *Journal of Coastal Research*, (83 (10083)), 272-276.
- (2) Sepúlveda, S. A., Moreiras, S. M., Lara, M., & Alfaro, A. (2015). Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides*, 12, 115-133.
- (3) Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534.
- (4) Viale, M., & Garreaud, R. (2014). Summer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes. *Monthly Weather Review*, 142(3), 1074-1092.
- (5) Valenzuela, R. R., Garreaud, I., Vergara, D., Campos, M., Viale, R., Rondanelli (2022). An extraordinary dry season precipitation event in the subtropical Andes: Drivers, impacts and predictability. *Weather and Climate Extremes* 37, 100472.

Caracterización de remociones en masa de movimiento lento basada en la integración de teledetección y datos de campo a lo largo de sectores urbanizados de la costa de Andalucía, España

Benjamín Gómez Catalán¹⁻²⁻³

(1) Facultad de Ingeniería y Geología, Universidad del Desarrollo

(2) DITEN, Universidad de Génova, Italia

(3) Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, España

En la provincia de Granada, en el sur de España, a lo largo de los sectores urbanizados en la costa oeste de Salobreña, el entorno construido ha sufrido diversos daños a lo largo del tiempo, lo que ha implicado la aplicación periódica de medidas de reparación y, en los casos más graves, incluso la demolición de estructuras. En las últimas décadas múltiples estudios fueron realizados en el área, aun así, la causa y origen de estos daños se mantenía incógnita.

El presente trabajo contribuyó a caracterizar las inestabilidades del terreno que afectan a la zona, comprender su origen, mecanismo de desplazamiento, velocidad, tipo de movimiento, extensión y zonificación. Debido a la naturaleza de los desplazamientos involucrados, se utilizó la integración de datos históricos, datos de campo y datos de teledetección. En particular, los datos de teledetección, como la precisión de las técnicas de InSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética), permitieron el desarrollo y análisis de mapas de velocidad superficial capaces de detectar puntos de medición del terreno que mostraban desplazamientos con tasas de velocidad de milímetros por año, durante el periodo de marzo de 2015 a septiembre de 2018, que es el periodo cubierto por los datos de teledetección considerados.

De esta manera fue posible describir 6 remociones en masa. Dada a la anisotropía de las deformaciones al interior de los cuerpos de remociones en masa identificados, fue necesario implementar el concepto de "zonas cinemáticas", el cual fue aplicado para describir zonas con distintos comportamientos dentro de una misma remoción en masa. La extensión de cada zona cinemática fue delimitada acorde a los mapas de velocidad superficial, geología y geomorfología del área, daños estructurales superficiales, revisión de imágenes satelitales, documentos históricos y estudios previos.

Siguiendo estos criterios, fue posible identificar un total de 16 zonas cinemáticas al interior de las 6 remociones en masa identificadas. Según sus velocidades de desplazamiento y estado de actividad, 14 de las zonas cinemáticas fueron descritas como deslizamientos activos de baja velocidad, con velocidades de desplazamiento de -17,6 a 4,4 (mm/año); mientras que las 2 zonas cinemáticas restantes corresponden a deslizamientos durmientes, inactivos durante el periodo considerado. En cuanto a sus tipos de movimientos, 7 de las zonas cinemáticas corresponden a deslizamientos por expansión lateral de macizos de roca a favor de la pendiente y 9 a deslizamientos compuestos. A la vez, se produjo un inventario preciso y actualizado de daños superficiales alrededor del entorno construido en el área en estudio. Además, se confeccionó un mapa geológico a escala 1:4000, ajustado a las dimensiones del terreno donde se emplazan las urbanizaciones afectadas y acorde al nivel de detalle requerido para discriminar el control geológico como factor de predisposición de las remociones en masa descritas. Por ende, este trabajo corresponde a la primera cartografía de las inestabilidades del terreno y desplazamientos, proporcionando el primer inventario de remociones en masa del área de estudio.

Palabras Clave: InSAR, Teledetección, Remociones en masa .

Agradecimientos: Esta investigación se realizó en el marco del proyecto de investigación "RADANDALUS" de la junta de Andalucía (P18-RT-3632), España.

Modelación Computacional de deslizamientos masivos usando el Método del Punto Material

Luis Lemus Mondaca¹⁻², Jaime Rodríguez Urquiza¹, Vicente Cáceres Pastenes¹, Diego Mery Parada¹

(1) Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Benavente 980, La Serena, Chile

(2) Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería del Terreno y Geociencias, Escola de Camins, C. Jordi Girona, 1-3. 08034, Barcelona, España

Los deslizamientos masivos de tierra y/o roca representan uno de los riesgos naturales más frecuentes y destructivos en los últimos años. Debido al crecimiento de las zonas urbanas y a su cercanía con este tipo de peligro geológico, muchas veces desconocido, es que se ha hecho relevante poder predecir eventuales deslizamientos y el potencial daño que pudiesen generar. Desde el punto de vista fenomenológico, un deslizamiento masivo adquiere la característica de catastrófico cuando este moviliza grandes volúmenes de material a altas velocidades, manifestándose un significativo potencial destructivo. Este tipo de deslizamiento también puede ser clasificado como un deslizamiento rápido, el cual puede tener o no, superficies de deslizamientos predefinidas. La predicción computacional de este tipo de fenómeno y el estudio de la cinemática posterior a la rotura es parte del trabajo que se presenta.

En países altamente sísmicos, la ocurrencia de sismos severos es un importante factor desencadenante en la generación de estos deslizamientos, y si de manera acoplada, se genera una variación en el contenido de humedad y/o presión de agua intersticial, se plantea un escenario con alta probabilidad de falla. Uno de los desafíos actuales es poder reproducir un escenario de inicio y desarrollo de la falla, y su posterior movimiento acelerado, considerando distintos factores desencadenantes. Por otro lado, es habitual el uso de métodos numéricos y analíticos para evaluar la estabilidad de una masa de suelo y/o roca, sin embargo, se estos reducen al cálculo de pequeñas deformaciones o factores de seguridad que indican si la masa de material es estable o no, lo cual se enmarca en un contexto de diseño para evitar fallas. Dada estas limitaciones, se explora un método numérico que sea capaz de modelar grandes deformaciones, las cuales dan lugar a las elevadas distancias de recorrido en deslizamientos masivos. En este trabajo se explora el Método Punto Material el cual ha sido desarrollado por Sulsky et al. (1995) y adaptado a problemas geotécnicos en el código Anura3D (Fern et al. 2019).

En los últimos años, el uso del MPM ha generado gran interés al tratarse de un método desarrollado con el propósito de trabajar frente a grandes deformaciones, contexto muy presente en este tipo de remociones en masa. Esto a diferencia de los métodos tradicionales, como por ejemplo el Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual presenta problemas de distorsión de malla. Por lo tanto, en este trabajo se propone llevar a cabo una modelación computacional que permita describir la dinámica de un deslizamiento producido por la acción de un sismo severo de gran duración utilizando MPM. Se modelan distintos casos reales de deslizamientos a nivel internacional y otros colapsos a nivel nacional producidos por grandes sismos, en donde se logra evidenciar la adecuada capacidad del método numérico para captar las elevadas velocidades y las grandes distancias de recorrido.

Palabras Clave: Deslizamientos masivos, Método Punto Material, Deslizamientos rápidos, Deslizamientos cosísmicos.

Agradecimientos: El autor Luis Lemus agradece a ANID de Gobierno de Chile, Beca de doctorado en el extranjero (CONICYT - PCHA/ Doctorado Internacional /2017-72180231).

References:

- Sulsky, D., Zhou, S.-J., Schreyer, H.L. (1995). Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. Comput. Phys. Commun. 87, 236–252.
- James Fern, Alexander Rohe, Kenichi Soga, Eduardo Alonso (2019). The Material Point Method for Geotechnical Engineering: A Practical Guide.

Nueva herramienta para el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana para remociones en masa inducidas por precipitaciones basado en umbrales de precipitación distribuidos espacialmente

Gonzalo Maragaño Carmona¹⁻²⁻³, Ivo Fustos Toribio³, Luis Felipe Robledo Aldana², Pierre-Yves Descote², Gustavo Gatica², Diego Villalobos²

(1) Universidad de La Frontera, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #1145, Temuco, Chile

(2) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería-CIS, Av. República 237, Santiago, Chile

(3) Universidad de La Frontera, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #1145, Temuco, Chile

A nivel mundial se ha observado un incremento significativo en la frecuencia de ocurrencia de movimientos en masa inducidos por precipitaciones (*RIL*, *rainfall-induced landslide*), surgiendo la necesidad, por parte de los organismos estatales tomadores de decisiones, de generar nuevas herramientas para la confección de nuevos sistemas de alerta temprana integrados, que permitan reducir los posibles daños causados como consecuencia de la acción de este tipo de amenazas geológicas. En este sentido, una de las implicancias más críticas que trae consigo el cambio climático es la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (Moreiras, 2005). Debido a esto, surge la oportunidad para desarrollar Sistemas de Alerta Temprana de Movimientos en Masa Inducidos por Lluvia (*RILES*), los cuales podrían pronosticar y alertar las posibles dinámicas que podrían adquirir las laderas bajo diferentes escenarios climáticos, permitiendo alertar de manera oportuna situaciones naturales críticas, evitando por consecuencia la pérdida de vidas.

Este estudio describe la implementación de un *RILEWS* utilizando el modelo *r.shalstab* en la cuenca del río Maipo, ubicada en la comuna de San José de Maipo (33,59°S, -70,38°O), una zona propensa a ser afectada por remociones en masa en los Andes Centrales (Sepúlveda y Jara, 2016; Sepúlveda *et al.*, 2020). El modelo *r.shalstab* es una herramienta computacional que calcula la estabilidad de las laderas, basándose en la teoría de la pendiente infinita, considerando la ruptura del medio según el modelo constitutivo de Mohr - Coulomb (Filipello y Strigaro, 2017).

La modelación se realizó a través de los softwares QGIS y GRASS GIS. La parametrización fue calibrada a partir de la integración de un modelo de elevación digital SRTM (30 m) y datos de geotecnia. El modelo *r.shalstab* permitió identificar áreas propensas a la activación de eventos *RIL*, mediante la obtención de mapas de susceptibilidad y mapas de umbrales de precipitación crítica para el colapso de cada ladera, considerando la estabilidad de laderas en función de la variación del Factor de Seguridad (*FoS*). Adicionalmente, considerando que los parámetros críticos del modelo constitutivo de Mohr - Coulomb son representados principalmente por el ángulo de fricción interna y la cohesión, se varió gradualmente dichos parámetros para determinar la incidencia de éstos en los resultados a través de un análisis de sensibilidad.

Los resultados de este estudio permitieron identificar laderas críticas para la activación de remociones en masa mediante variaciones negativas del Factor de Seguridad (*FoS*). Además, se determinó umbrales de precipitación críticos para la activación de inestabilidades de laderas. Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que el ángulo de fricción interna condiciona significativamente la variación de los valores del *FoS*, en desmedro de la cohesión a lo largo de la cuenca del río Maipo.

Los resultados fueron consistentes con mapeos previos, y además, los valores obtenidos se correlacionan espacialmente con geoformas de depósitos de remociones en masa ocurridas en la cuenca. También, se identificó que zonas topográficamente elevadas y quebradas con pendientes moderadas a altas tienen una probabilidad mayor para desarrollar eventos *RIL*.

En conclusión, el presente estudio puede ser aplicado como un *RILEWS* si se integra a modelos de previsión atmosférica y a bases de datos de los suelos presentes en la cuenca. Como futuros alcances se sugiere incrementar la densidad de información geotécnica e hidráulica de los materiales que componen las laderas, para reducir la incertidumbre. Este estudio abre la puerta a la creación de nuevas herramientas que apoyen la toma de decisiones en la gestión del riesgo ante remociones en masa inducidas por precipitaciones.

Palabras Clave: *RIL*, Andes Centrales, *r.shalstab*, *RILEWS*, cuenca Río Maipo.

Financiamiento: Proyecto PII 180007.

Agradecimientos Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad de La Frontera, Temuco. Proyecto PII180007 de la Universidad Andrés Bello.

Referencias:

- Filipello, A., & Strigaro, D. (2017). Addon *r.shalstab*-A model for shallow landslide susceptibility. GRASS GIS Manual.
- Moreiras, S. (2005). Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides*, 2, 53–59.
- Sepúlveda, S., Alfaro, A., Lara, M., Carrasco, J., Olea-Encina, P., Rebolledo, S., & Garcés, M. (2020). An active large rock slide in the Andean paraglacial environment: The Yerba Loca landslide, central Chile. *Landslides*, 18, 697–705.
- Sepúlveda, N., & Jara, C. (2016). Efectos geológicos del sistema frontal de la zona central del país, 14–18 abril de 2016. Región Metropolitana, Comuna de San José de Maipo; Servicio Nacional de Geología y Minería: Santiago, Chile. Disponible online: https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2016-01.pdf

Monitoreo de remociones en masa y crecidas en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas, Región de Magallanes y la Antártica Chilena

Antonio Andrés Muñoz Muñoz¹, Luna Pérez Pérez¹, Víctor Gálvez Riquelme¹, Bruno Sánchez Trincado¹, Enrique Opazo Castro¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

En la parte media del valle del río Las Minas, se han generado numerosas remociones en masa, de diversa magnitud, intensidad y tipo. Estas remociones al depositarse en el cauce del río constituyen el material que, ante lluvias intensas, es transportado por el río generando aluviones que desbordan al alcanzar los puentes de la ciudad. Tal es el caso, que se ha constatado la ocurrencia, entre 1941 y 2012, de 10 aluviones que desbordaron el río Las Minas y, considerando solo los 5 más destructivos, se han estimado pérdidas por más de 30 mil millones de pesos. Por la intensa ocupación del territorio este río ha ido perdiendo su drenaje natural y cada vez hay más personas expuestas ante aluviones (Muñoz *et al.*, 2021).

En el marco de los programas financiados por el Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena (Fondo Nacional de Desarrollo Regional; FNDR) orientados en el monitoreo de remociones en masa y aluviones en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas; en este trabajo se expone un resumen de los principales avances y aprendizajes adquiridos referente al comportamiento de estos procesos y su relación con variables hidrometeorológicas en el área de estudio durante cuatro años de monitoreo (2019-2022). En la cuenca del río Las Minas se han instalado estaciones hidrométricas, meteorológicas, una estación hidrométrica, una estación total robotizada y cámaras de televigilancia. Estas herramientas permitieron la medición de caudales y variables meteorológicas y determinar tasas de movimiento superficial. Además, se han realizado mediciones geodésicas con un sistema global de navegación por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) y vuelos fotogramétricos con drones. Con esto último, se elaboró un catastro detallado de remociones en masa y se identificaron nuevos sectores críticos.

En el periodo de estudio se da cuenta de aumentos de caudal asociados principalmente al deshielo, de tal forma, que la disminución de la altura de nieve, el aumento de la humedad del aire y de la lluvia acumulada permiten explicar significativa y linealmente el incremento de caudal. El deshielo también permite explicar los pulsos de movimiento de las remociones en masa, aunque en general los movimientos detectados son de velocidades moderadas a extremadamente lentas, asociados principalmente deformaciones de ladera, las cuales no se descarta que sean precursoras de próximos deslizamientos.

Finalmente, se discuten las limitaciones de este trabajo y los aspectos a desarrollar con miras en el desarrollo de un sistema de alerta de aluviones.

Palabras Clave: remociones en masa, monitoreo, aluviones.

Financiamiento: Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Referencias:

- Muñoz, A.; Pérez, L.; Gálvez, V.; Sánchez, B.; Opazo, E. 2021. Remociones en masa y crecidas fluviales en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas, región de Magallanes y la Antártica Chilena. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-91: 151 p. Santiago.

Análisis de amenaza de procesos aluvionales según metodología suiza en quebradas de la alta cordillera, Región Metropolitana de Chile

Rodrigo Osorio Alvarez¹, Paulina Arellano Cortés¹, Leonardo Carreño Osorio¹, Constanza Celis Sáez¹, Carlos Sierra Rojas¹, Pablo Flores Carreño¹

(1) WSP, Mecánica de Rocas, Magdalena 181, Santiago Chile

Se ha desarrollado un análisis de amenaza de procesos aluvionales en la zona andina montañosa al este de la Región Metropolitana de Chile, a lo largo de una red vial operacional minera de más de 130 km.

Los procesos relacionados con eventos aluvionales representan peligros geológicos con el potencial de interrumpir la operatividad de la red vial y ocasionar pérdidas significativas, asociadas a daños a la infraestructura y poniendo en riesgo la seguridad de los trabajadores.

El análisis se realizó mediante el método estandarizado suizo, que está basado en los trabajos de Gertsch (2009), Gertsch et al. (2012), Lehmann (1993), Spreafico et al. (1996) y Rickenmann (1999) de la Universidad de Berna y el Instituto Federal de Investigación Forestal, Nieve y Paisajes (WSL) de Suiza, adaptado a las condiciones de alta montaña en Chile. Esta metodología combina el levantamiento de información de terreno junto con modelaciones numéricas (mediante el código RAMMS) y relaciones con estudios en zonas comparables en cuanto a topografía, litología, clima y morfología. Amsler et al. (2018) realizó un estudio similar, aplicando esta metodología en el sector de la quebrada de Macul, ubicada en la alta montaña de los andes de Chile central.

La metodología se puede dividir en cinco etapas: (i) revisión de antecedentes, (ii) generación de catastro de eventos en la zona de estudio, (iii) trabajo en terreno, (iv) modelación numérica y (v) elaboración de mapas de amenazas.

Mediante el catastro de eventos se analiza la frecuencia y características de los eventos aluvionales, con la definición de períodos de retorno e intensidades. El trabajo en terreno proporciona los parámetros necesarios para la modelación, tales como el volumen de sedimentos y los parámetros friccionales basados en la erodabilidad, compactación de los sedimentos, litología, granulometría y rugosidad del cauce aluvional.

Para el cálculo de la carga de sedimentos se utilizó la metodología "Lehmann Desktop" (Gertsch et al., 2012). Esta metodología consiste en la separación del cauce en secciones homogéneas respecto a la disponibilidad de sedimentos y la geometría/morfología del cauce, donde se estima para cada sección el volumen de material disponible de acuerdo a los espesores de sedimentos presentes en el lecho y taludes de la quebrada, ponderados de acuerdo a tablas de estimación presentes en Gertsch et al. (2012). Las quebradas fueron estudiadas respecto a su cobertura de sedimentos, rastros de eventos ocurridos, testigos morfológicos como levées, entre otros. Se definió la carga de sedimentos en cada una de las secciones, determinando la masa seca para los escenarios de 10, 30 y 100 años. La erodabilidad del lecho y de los taludes adyacentes se relacionó con la litología, compactación de los escombros y la granulometría de los depósitos de eventos ocurridos.

La modelación en el software RAMMS genera mapas de altura, velocidad y energía máxima de los flujos, lo que permite evaluar la intensidad de los aluviones. Los resultados de la modelación se calibraron y compararon con eventos aluvionales registrados en enero de 2023, lo que permitió calibrar y validar la metodología con las condiciones de alta montaña en Chile. Este enfoque metodológico resulta crucial en la determinación y planificación de medidas de protección efectivas.

Esta metodología presenta un potencial significativo como herramienta de gestión del riesgo, permitiendo identificar, ubicar y categorizar de manera eficiente los peligros identificados.

Palabras Clave: Peligro Geológico, Ramms, Eventos aluvionales, Modelación.

Referencias:

- Amsler, C., Raissig, A., Rohrbach, L., Scheuner, T., Schauss, A. (2018): Análisis de procesos aluvionales según metodología Suiza en la Quebrada de Macul, Región Metropolitana: Un enfoque geomorfológico con modelaciones numéricas. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción, Chile.
- Gertsch, E. (2009) Debris delivery of alpine torrent systems in the case of major events – event analyses and development of an evaluation system. Inaugural dissertation of the philosophical natural sciences faculty of the University of Bern. Geographic Institute of the University of Bern.
- Gerstch, E., Lehmann, Ch., Spreafico, M. (2012) Methods for the Estimation of Erosion, Sediment Transport and Deposition in Steep Mountain Catchments. A contribution to the International Sediment Initiative of UNESCO/International Hydrological Programme. Report No II-21 of the CHR/KHR. ISBN 978-90-70980-36-8. rapport_ii_21.pdf (chr-khr.org).
- Spreafico, M., Lehmann, C., & Naef, O. (1996) Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Landeshydrologie und-geologie. Groupe de travail pour L'hydrologie opérationnelle (GHO).
- Lehmann, C. (1993) Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia, Band G42. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Rickenmann, D. (1999) Empirical relationships for debris flows. Natural hazards, 19, 47-77.

Detección y alerta temprana de aluviones con instrumentación sismo-acústica

José Luis Palma Lizana¹, Diego González-Vidal¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario S/N, Concepción, Chile

En 1985 más de 23.000 personas murieron en el pueblo Armero, Colombia, producto de un aluvión volcánico (lahar) generado en una erupción del volcán Nevado del Ruiz. En el volcán Villarrica, Chile, un lahar causó la muerte de 22 personas al llegar a la ciudad de Coñaripe durante la erupción de 1964. En Chile y el mundo los lahares han generado pérdidas de vidas y un gran impacto a la infraestructura y sustento económico. Además, las ocurrencias de aluviones generados fuera de ambientes volcánicos en Chile (p.ej. el aluvión de Santa Lucía en diciembre de 2017) han dejado en evidencia que es necesario contar con herramientas de monitoreo y alerta temprana que permitan reducir el riesgo y, finalmente, minimizar el impacto en la población. Sin embargo, en Chile no existe una tecnología apropiada y específica para el monitoreo, detección y alarma de la ocurrencia de aluviones. Las dificultades más importantes para desarrollar e implementar un sistema como este son: 1) los componentes del equipo son de alto costo y deben ser importados, 2) se necesitan expertos para construir las estaciones de monitoreo y procesar los datos, 3) se requiere desarrollar nuevos algoritmos de detección, y 4) no existen protocolos para integrar este tipo de estaciones en un sistema de alerta temprana que incorpore la colaboración de diferentes instituciones.

Las investigaciones que se han desarrollado en tecnologías para la detección de aluviones y otras corrientes de gravedad, basadas en mediciones de infrasonido y sísmica, muestran que es posible implementar una tecnología innovadora, de bajo costo, y eficaz para la detección y alerta temprana de aluviones. Algunas de las conclusiones más importantes que se han obtenido de investigaciones anteriores son: 1) La utilización de arreglos de infrasonido constituye una metodología adecuada y conveniente para detectar la ocurrencia y el avance de aluviones, y presenta importantes ventajas sobre otros métodos, 2) Con arreglos de infrasonido es posible detectar aluviones a varios kilómetros de distancia, aumentando el tiempo entre la detección y alarma que permite a las personas alejarse de zonas inundables, 3) Estudios de terreno de los depósitos generados por los lahares asociados a la erupción del volcán Villarrica en 2015, confirman las observaciones realizadas con arreglos de infrasonido y sismicidad.

En esta presentación se describe el diseño de un sistema de monitoreo, detección y alerta temprana de aluviones que cuenta con sensores de infrasonido y sísmicos, digitalización, procesamiento y comunicación de datos, y los algoritmos de procesamiento necesarios para generar una detección y alerta eficaz. (Notar que NO es un sistema predictivo que requiera evaluar variables meteorológicas.) Este equipamiento incluye algoritmos computacionales capaces de realizar una detección eficiente y efectiva, incluso en presencia de abundante ruido atmosférico. Se presentarán ejemplos de su funcionamiento teórico en casos sintéticos y reales. Este es un proyecto FONDEF IT21 activo que comenzó en mayo de 2023 y culminará en abril de 2024.

Palabras Clave: lahar, aluvión, flujo de detritos, infrasonido, alerta temprana.

Financiamiento: ANID, FONDEF IT21I0086.

Estado de conservación de Monumento Histórico Huellas de Dinosaurios, post aluvión de enero de 2023. Comuna de San Fernando, Región de O'Higgins

Francisco Ramírez Navarro¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

RESUMEN

El Monumento Histórico y Paleontológico Huellas de Dinosaurios se encuentra en la localidad de Termas del Flaco, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, y consiste en un estrato de areniscas calcáreas perteneciente a la Formación Baños del Flaco (Titoniano-Jurásico Superior). Dicho afloramiento posee aproximadamente 200 metros de ancho por 10 metros de alto, donde se identifican diferentes improntas dejadas por dinosaurios ornitópodos, terópodos y saurópodos. Durante el 8 de enero de 2023, un flujo de detritos descendió por la quebrada en donde se encuentra el Monumento, removiendo parte del material en la base del estrato, desestabilizándolo y generando un deslizamiento planar en el sector norte del afloramiento, producto de las estructuras preexistentes y la acción de la gravedad, afectando irreversiblemente una porción de las huellas existentes y perturbando parcialmente los sectores aledaños. Durante abril de 2023, Sernageomin realizó una visita técnica al sector, en un trabajo conjunto entre las Unidades de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas, y Geopatrimonio, realizando observaciones en terreno y un levantamiento fotogramétrico mediante sobrevuelo de *drone*. Se estimó a partir de las fotografías obtenidas un área mínima afectada de 105.28 m² (al menos 300 m³ de material removido), determinándose que en el caso de que un futuro evento volviera a afectar la estabilidad de la pared rocosa donde se encuentran las huellas, ya sea por paso de un flujo de detritos, erosión acentuada por lluvias intensas o sismo de mediana magnitud, se podrían generar nuevos deslizamientos planares debido a las condiciones pre existentes mencionadas, afectando así al patrimonio local.

INTRODUCCIÓN

El Monumento Histórico y Paleontológico Huellas de Dinosaurios se encuentra en la localidad de Termas del Flaco, perteneciente a la comuna de San Fernando, Provincia de Colchagua en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Este fue declarado Monumento Nacional por el Decreto Supremo N° 4866 el año 1967, siendo descrito por primera vez en 1968 por Casamiquela y Fasola (1) en la Formación Baños del Flaco (Titoniano-Jurásico Superior), quienes identificaron dos icnoespecies de dinosaurios: *Iguanodonichnus frenki* y *Camptosaurichnus fasolae*, ambas pertenecientes al Orden Ornithopoda. Estudios posteriores concluyeron que se trata de huellas de ornitópodos, terópodos y saurópodos, correspondiendo el conjunto a la icnofacies *Brontopodus* (2).

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DEL SECTOR TERMAS DEL FLACO

El Monumento Huellas de Dinosaurio se encuentra específicamente en un estrato perteneciente a la Formación Baños del Flaco. Dicha Formación fue descrita por primera vez por Klohn (3) en la localidad de Termas del Flaco, en la ribera sur del Río Tinguiririca, compuesta principalmente por calizas, calizas arenosas, margas y areniscas calcáreas, predominantemente de color gris, y en menor proporción, conglomerados, areniscas glauconíticas y lutitas. Debido al contenido fosilífero asociado (*Pholadomya gigantea* Sow., *Nautilus* cf. *Pertriatius*, *Neocomites* sp. y *Trigonia picunensis* Weav), Klohn propuso una edad Titoniano superior – Hauteriviano. Cubre en forma concordante a la Formación Río Damas y sus afloramientos se extienden en una franja noreste-sureste entre el Río Maitenes y el Río Pellejo.

Localmente, la estructura dominante corresponde a la falla El Fierro, la cual se localiza en la ladera sur del valle del río Tinguiririca, frente a la localidad Termas del Flaco (4). Esta estructura se ha definido como una falla inversa de bajo ángulo con vergencia hacia el este y junto a otras fallas del sector y otros sistemas equivalentes hacia el norte controlaron primero la evolución geológica del borde oriental de la denominada Cuenca Abanico, y con posterioridad del levantamiento de la cordillera, desde fines del período Eoceno, hace unos 37 millones de años (5,6,7).

En la región de O'Higgins, los rasgos geomorfológicos predominantes son la presencia de cuatro fajas longitudinales: planicies costeras, Cordillera de la Costa, depresión intermedia y Cordillera de los Andes; particularmente, el sector en estudio se encuentra en esta última. En el sector, se tiene la marcada influencia del río Tinguiririca, el cual modela parte del paisaje presente. Este nace en la Cordillera de los Andes en el glaciar oriental del volcán Tinguiririca, que más hacia el sur se junta con el río Las Damas, doblando hacia el oeste en la quebrada Lo Herrera y cruzando la localidad de Termas del Flaco. Dentro de las geoformas destacadas en el sector, se observa una serie de abanicos aluviales en la zona de descarga de las quebradas secundarias existentes en el área, las cuales desembocan en abanicos aluviales mayores, o en el valle del río Tinguiririca.

El área visitada se caracteriza por contar con pendientes de hasta 30° en las laderas y con promedios cercanos a los 15°-25° a lo largo de toda su extensión, mientras que la localidad de Termas del Flaco, existen pendientes inferiores a 10°, contenidas en el valle fluvial del río Tinguiririca. La pendiente de la quebrada, en donde se encuentran las huellas de dinosaurios, se estima superior a los 60°.

MONUMENTO PALEONTOLÓGICO HUELLAS DE DINOSAURIOS

El Monumento Nacional se emplaza en un estrato de areniscas calcáreas perteneciente a la Formación Baños del Flaco. Posee dimensiones aproximadas de 200 metros de ancho por 10 metros de alto y tiene una orientación de N10°E/48°W. Este estrato aflora en una de las quebradas menores existentes en el sector norte de la localidad de Termas del Flaco, en el cual se identifican diferentes improntas dejadas por dinosaurios ornitópodos, terópodos y saurópodos.

Dicha quebrada se caracteriza por encontrarse parcialmente rellena con depósitos aluvionales antiguos y recientes, que han sido retransportados y re transportados por eventos aluvionales ocurridos en los últimos 60 años, considerando las fotografías y descripciones existentes en las primeras publicaciones científicas que mencionan el lugar (1,3), aunque no se descarta que el proceso de profundización de la quebrada haya comenzado antes de esto. Lo anterior ha permitido la exhumación del afloramiento rocoso, con la consecuente aparición de más huellas de dinosaurios que no habían sido descritas en las primeras publicaciones; es posible diferenciar un cambio de coloración en la pared rocosa, entre marrón en la parte superior, correspondiente al sector que ha estado expuesto a la intemperie por un tiempo más prolongado, y gris en la parte baja, que ha sido expuesto en los últimos años debido al transporte del material existente que rellenaba la quebrada, exhibiendo diferentes grados de meteorización.

VISITA A TERRENO Y RECOMENDACIONES

El talud rocoso que contiene las huellas de dinosaurios presenta fracturas discontinuas pero persistentes, con una mayor frecuencia en el sector norte. En esta zona, el talud se encontraba sustentado en su base por depósitos aluvionales antiguos; sin embargo, debido a la ocurrencia de una remoción en masa del tipo flujo de detritos que descendió por la quebrada, atribuible al evento meteorológico de lluvias intensas que afectó la zona central de Chile durante los días 7, 8 y 9 de enero, parte de estos depósitos fueron removidos, ocasionando la desestabilización del talud y su consecuente desmoronamiento (Fig. 1).

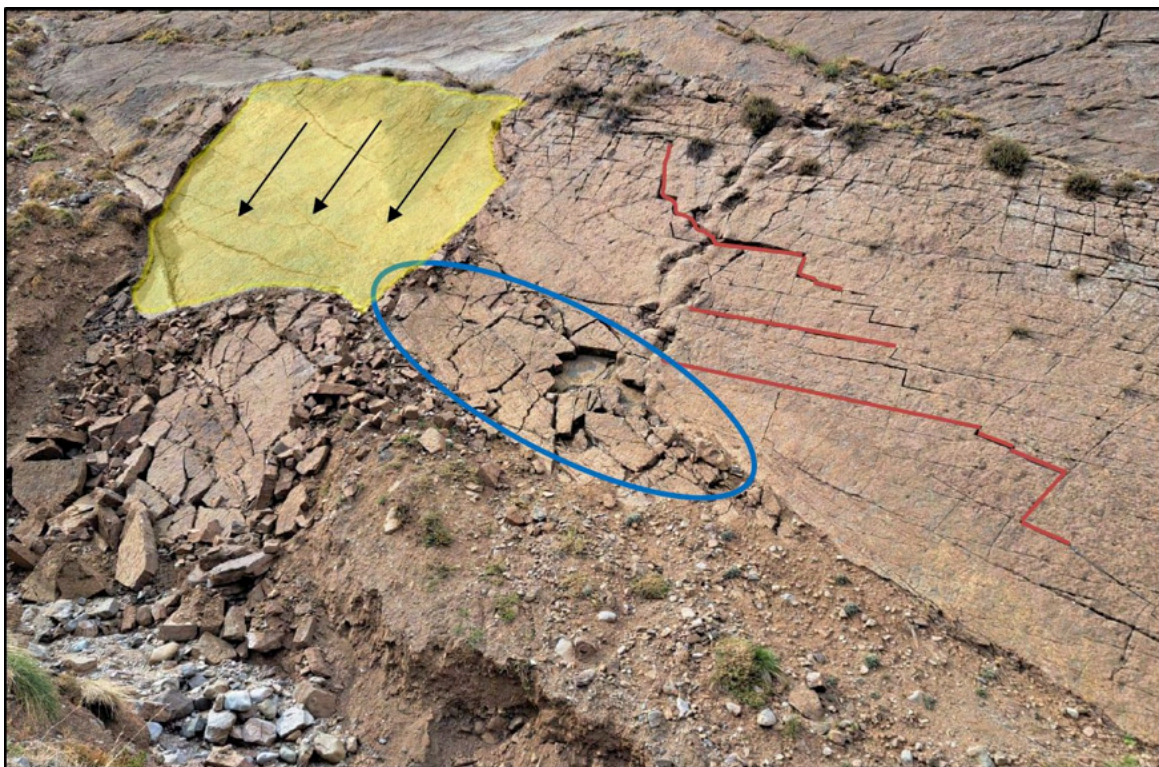


Figura. 1. Vista general de deslizamiento planar en ladera, ocasionado por erosión en la base del talud. El flujo aluvional ocurrido el 8 de enero de 2023, removió parte del material ubicado en la base del afloramiento, lo que favoreció el deslizamiento del estrato que contenía las improntas (área amarilla señala el lugar afectado por el proceso y flechas negras indican dirección de movimiento). En anaranjado, se dibujan las grietas de tracción más pronunciadas en la parte del afloramiento que aún no desliza, pero que podrían descender en caso de que otro evento desestabilizara el sector. El óvalo azul señala la zona inestable dentro del talud que podría deslizar en caso de desestabilizarse o erosionarse los depósitos aluvionales existentes en su base.

Por lo anterior, durante abril de 2023 se realizó una visita al Monumento Nacional por parte de SERNAGEOMIN para evaluar su estado de conservación (8), reconociéndose en terreno un deslizamiento planar de roca que afectó al sector norte del talud donde afloran las huellas de dinosaurios.

Se realizó un levantamiento fotogramétrico mediante RPA, modelo Autel Evo II Pro rtk, a partir del cual se generaron ortofotomosaicos y un modelo de elevación digital (DEM). A partir de los productos obtenidos, se estimó un área mínima afectada de 105,28 m², lo que significan al menos 300 m³ de material removido por el proceso. Se constató además que inmediatamente a la derecha del sitio afectado, en la misma pared rocosa hacia el sur, se evidencia la propagación de grietas de tracción en la parte superior del talud, con una orientación N70°E/22°SE, y un incipiente desprendimiento del material desde su base, el cual se aprecia parcialmente estabilizado por la presencia de depósitos aluvionales antiguos que no fueron removidos por el flujo de detritos mencionado previamente. No obstante, las fracturas observadas podrían seguir extendiéndose y abriéndose lo que puede propiciar nuevos deslizamientos en el caso de que un futuro evento removiera el material estabilizador en la base del talud (depósito aluvional), ya sea por el paso de un nuevo flujo, erosión causada por lluvias intensas o un sismo, lo que daría paso a nuevos deslizamientos planares, afectando al patrimonio existente ya dañado.

Considerando lo anterior, para promover la conservación y divulgación del Patrimonio existente, sería recomendable el rescate de las huellas que fueron desprendidas de la placa portadora por efecto del deslizamiento. En el afloramiento de las huellas fue posible observar 2 o 3 bloques con huellas de dinosaurio intactas los que podrían ser trasladados y rescatados con el permiso y supervisión del Consejo de Monumentos Nacionales y de expertos en el tema. Lo rescatado podría resguardarse y exhibirse tanto en la localidad de Termas del Flaco como en la ciudad de San Fernando, permitiendo un acercamiento de estas maravillas naturales a un mayor número de personas.

A su vez, es posible buscar opciones para asegurar la conservación del talud afectado y prevenir futuros deslizamientos planares. Para ello, se recomienda consultar con expertos en geotecnia para determinar posibles medidas de estabilización, como podrían ser pernos de anclaje u otros sistemas que permitan fijar la placa portadora de huellas. Es importante destacar que el diseño y ejecución de este tipo de medidas deberían ser determinadas por los entes competentes en el tema.

Palabras Clave: remoción en masa, monumento nacional, huellas de dinosaurios, Sernageomin, O'Higgins.

Referencias:

- Casamiquela, R.M., Fasola, A. 1968. Sobre pisadas de dinosaurios del Cretácico Inferior de Colchagua (Chile). Universidad de Chile, Departamento de Geología 30: 1-24.
- Moreno, K., Pino, M. 2002. Huellas de dinosaurios en la Formación Baños del Flaco (Titoniano-Jurásico Superior), VI región, Chile: paleontología y paleoambiente. Revista Geológica de Chile 29 (2): 151-165.
- Kohn, C. 1960. Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 8, p. 1-95.
- Arcos, J. 1987. Geología del Cuadrángulo Termas del Flaco. Provincia de Colchagua, VI Región, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica. Memoria de título (inédito): 298 p. <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/index.asp?param=o%AD%88%92bk%93%88p&Op=3>.
- Piquer, J., Castelli, J., Charrier, R., Yáñez, G. 2010. El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile Central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. Andean Geology 37: 32-53.
- Mescua, J., Giambiagi, L., Tassara, A., Giménez, M., Ramos, V. 2014. Influence of pre-Andean history over Cenozoic foreland deformation: structural styles in the Malargüe fold-and-thrust belt at 35 S, Andes of Argentina. Geosphere 10 (3): 585-609.
- Mosolf, J., Gans, P., Wyss, A., Cottle, J., Flynn, J. 2018. Late Cretaceous to Miocene volcanism, sedimentation and upper-crustal faulting and folding in the Principal Cordillera, central Chile: field and geochronological evidence for protracted arc volcanism and transpressive deformation. Geological Society of America Bulletin 131 (1-2): 252-273.
- Ramírez, F., Arenas, M., Parra, J., Lecaros, J. 2023. Visita técnica para evaluar estado de conservación de Monumento Histórico Huellas de Dinosaurios, post aluvión enero 2023. Comuna de San Fernando, Región de O'Higgins, informe técnico (inédito): 27 p. Santiago.

Análisis de susceptibilidad de procesos de remoción en masa en la cuenca de Nonguén, Concepción, Región del Bio Bio, Chile

Álvaro Rozas Ruiz¹, Mauricio Espinoza Vargas¹, Natalia Sepúlveda Díaz²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) SERNAGEOMIN

Las remociones en masa son un movimiento lento o rápido de un determinado volumen de suelo, roca o ambos. Estos movimientos corresponden a procesos gravitacionales generados por una serie de factores. Estos factores pueden ser de carácter interno, los cuales caracterizan y definen el material (litología, estructura, comportamiento hidrogeológico, propiedades físicas) y externos (aplicación de cargas estáticas o dinámicas, variaciones en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos y alteraciones geométricas de los taludes) (Hauser, 2000).

Estos eventos pueden ser de carácter catastrófico en zonas pobladas, ya que los asentamientos humanos, debido a la situación morfológica del país, se emplazan en torno al pie de relieves empinados o zonas llanas adyacentes a ríos, lo que aumenta la vulnerabilidad frente a los fenómenos de remociones en masa (Hauser, 2000).

La cuenca del Estero Nonguén, se ubica entre los 36°49'S y los 36°54'S y los 72° 57'O y los 73° 01'O, con orientación de sur a norte, con una longitud aproximada de 17 km, una superficie de 52,68 km² y una altura máxima de 430 m.s.n.m. (EULA, 2002).

El sustrato rocoso del complejo granítico (el cual está altamente alterado y se presenta como suelo residual) se desarrolla en la cuenca del Estero Nonguén, las fuertes pendientes que caracterizan el relieve del área, así como una densa red de drenaje con quebradas muy inscritas, generan erosión activa e implican una alta fragilidad del área ante eventos de deforestación, aumentando el riesgo de procesos de deslizamientos de rocas, remociones en masa y procesos de erosión lineal generando cárcavas (EULA, 2002).

Durante el año 2005 ocurrieron remociones en masa en varios sectores del gran Concepción, tales como Agüita de la Perdiz, Nonguén, Cerro La Pólvara y Palomares, donde este tipo de fenómenos es recurrente. Esto debido a que se encuentran en zonas que presentan una gran susceptibilidad a la generación de remociones en masa por la fuerte pendiente, condiciones naturales y la intervención antrópica (Naranjo et al., 2005).

Este trabajo se marca en la necesidad de definir de forma más detallada las zonas de la cuenca de Nonguén que se ven más propensas a sufrir eventos de remoción en masa y que además puedan afectar a la población circundante. Para lograr este objetivo, en primera instancia se debe reconocer las zonas donde se han producido históricamente eventos de remociones en masa, asimismo distinguiendo los diferentes factores que producen estos movimientos. Posteriormente se identifican puntos críticos, los cuales se definen como: puntos geográficos de la zona de estudio que han sufrido remociones en masa cercanamente a la población y de manera recurrente. Con esto se elabora un inventario multitemporal de puntos críticos de remociones en masa para así finalmente elaborar un mapa de susceptibilidad multicriterio de la zona, teniendo en cuenta variables como el clima, precipitaciones, uso de suelo, geología, grado de desarrollo de suelo y pendiente, donde cada parámetro es calculado mediante el proceso de análisis jerárquico (AHP) (Saaty, 1988). Todo esto será logrado gracias a un trabajo de recopilación bibliográfica, análisis temporal de imágenes satelitales, análisis del modelo de elevación digital, visitas a terreno de los puntos críticos y complementado con el relato histórico de la comunidad.

De este modo, el objetivo de este trabajo consiste en establecer las zonas de mayor susceptibilidad a eventos de remociones en masa con énfasis en la zona urbana de la cuenca Nonguén. Cabe destacar que este proyecto se enmarca en un proyecto de Ciencia Pública que trabaja directamente con la comunidad local, por lo que se espera que este insumo pueda ser utilizado como base para proyectos futuros de planificación territorial.

Palabras Clave: Remociones en masa, Susceptibilidad, Cuenca Nonguén, Riesgo y peligro.

Financiamiento: Se enmarca dentro del proyecto Ciencia Pública CP22-C005 "Diálogos en Movimiento: Geoecología y Comunidad en torno al Estero Nonguén" cuyo Director es Mauricio Espinoza Vargas.

Referencias:

- EULA. (2002). Estudio básico de zonificación del fundo Nonguén. Concepción.
- Ramírez, P. (2004). Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén. Universidad de Concepción, Concepción.
- Naranjo, J. A.; Clavero, J.; Hauser, A.; Ramírez, P. (2005). Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 En Concepción, VIII Región. Informe inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hauser, A. (2000). Remociones en masa en Chile (versión actualizada). SERNAGEOMIN. Santiago, Chile.
- Saaty, T. L. (1988). The Analytic Hierarchy Process; Planning, Priority Setting Resource Allocation. Nueva York: McGraw-Hill.

Influencia del Lineamiento Lavapie-Patagual-Pileo en la generación de remociones en masa y su impacto en la ruta CH-156

Natalia Sofía Sepúlveda Díaz¹, Emiliano Vega Ruíz², Mauricio Espinoza Vargas², Karina López², Ambrosio Vega³

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Dirección regional Sur, San Martín 1295, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Chacabuco 1234, Concepción, Chile

(3) Helmholtz GFZ German Research Center for Geosciences

La cordillera de Nahuelbuta, compuesta por rocas metamórficas e intrusivas de edad paleozoica, corresponde a una de las principales morfoestructuras de la región del Biobío. Específicamente, en el curso inferior del río Biobío, afloran además secuencias sedimentarias triásicas continentales y marinas correspondientes a la Formación Santa Juana, las cuales se encuentran en contacto por falla con el basamento metamórfico (Ferraris, 1981). La actividad tectónica que ha afectado a estas unidades es evidenciada por las diversas fallas y pliegues que han sido identificadas a la Formación Santa Juana en las proximidades al sector Patagual, dentro de las cuales una estructura destaca por sobre todas: el lineamiento Patagual-Pileo.

Este lineamiento corresponde a un rasgo topográfico de escala regional, de orientación ENE-WSW, el cual corta transversalmente a la Cordillera de Nahuelbuta, con una extensión terrestre de casi 20 km desde la comuna de Hualqui a Lota, y aumentando hasta aproximadamente 70 km al extenderse hasta la localidad de Punta Lavapié, donde parte de la traza cruza el golfo de Arauco y reaparece en su límite sur. Uno de los rasgos más notorios que se asocia al lineamiento Patagual-Pileo es una gran deflexión del río Biobío, sugiriendo un desplazamiento de ca. 4 km en sentido dextral. Quezada (1996) menciona un cambio en la dirección del drenaje, el cual proviene desde el SE, para luego cambiar su dirección al W a la altura de Concepción, desembocando en el Golfo de Arauco. Alternativamente, la deflexión del río puede corresponder a una adaptación a una discontinuidad ya existente. De esta manera, aun cuando corresponde a un rasgo de primer orden en la Cordillera de Nahuelbuta, no se han realizado estudios en detalle que determinen su carácter de falla, su temporalidad ni su impacto en la geomorfología y redes de drenaje del área. No obstante, diversos autores identifican estructuras observadas e inferidas en torno a este lineamiento, pudiendo observar diferencias topográficas perpendiculares a éste de más de 300 metros. Además, estudios sugieren una tectónica de bloques en las inmediaciones del lineamiento con fallas normales de orientación NE-SW, generando bloques descendidos y otros basculados, además de cuencas estructurales, y cambios abruptos en la pendiente del basamento expuesto por estas estructuras.

Por otro lado, numerosas remociones en masa se asocian espacialmente a este lineamiento a lo largo de una de las rutas principales para el transporte forestal de la región ("Ruta de la Madera"). Durante el verano de 2023, numerosos incendios afectaron este sector; específicamente, entre los km 18 y 24, y en las inmediaciones del sector de la localidad de Pileo, zonas de remociones en masa de tipo deslizamiento y sus quebradas asociadas perdieron la cobertura vegetal quedando descubiertas y por ende, favoreciendo la reactivación de remociones.

El trabajo preliminar de terreno indica que las unidades geológicas afectadas por el lineamiento Patagual-Pileo en este sector corresponden a rocas metamórficas pertenecientes a la serie oriental, las cuales muestran un alto grado de meteorización y un diaclasamiento paralelo a la traza de la falla Patagual-Pileo de orientación noreste-suroeste (traza de la estructura es N45°E). Adicionalmente, se desarrollaron perfiles SWATH en modelos de elevación digital de alta resolución (5m) identificándose un desnivel de 200 m dentro de un cordón montañoso de 400 m de altitud y confirmando la expresión de la estructura. El objetivo de este trabajo es evaluar la relación que entre este lineamiento, el control estructural existente y el debilitamiento y generación de zonas de debilidad en las rocas, para comprender el control de esta estructura en los procesos de remociones en masa a través de una reducción de la calidad del macizo rocoso, posiblemente gatillada por un mayor fracturamiento, alteración, meteorización y desarrollo de altas pendientes. Las observaciones indican que parece existir una evolución del drenaje existencia relacionado con la tectónica de bloques de Arauco y que se representa a lo largo de la porción de la Cordillera de Nahuelbuta, sumado a la actividad antrópica acelerada por la generación de nuevas rutas para la conectividad forestal y/o industrial.

Palabras Clave: Formación Santa Juana, Patagual Pileo, Remociones en masa, geología estructural, fallamiento dextral.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería Delegación regional Presidencial del Biobío Universidad de Concepción.

Referencias:

- Quezada, J. 1996. Geología Urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción, 149 pp (Inédito).
- Melnick, D. 2000. Segmentación de zonas de ruptura de mega cabalgamiento a partir de patrones de deformación de antearco durante cientos a millones de años, Península de Arauco, Chile.

Comparación de metodologías estadísticas y multicriterio para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa en la carretera LM-116_ Perú

Jenny Vásquez Acuña¹

(1) Anddes, Geoprocesos, Av. Javier Prado Este Cdra. 48, Edificio Capital Golf, Piso 13 Santiago de Surco, Lima 15023, Perú, Lima, Perú

1. Resumen

Durante mucho tiempo se ha observado que la Carretera Central Peruana (PE-22) y la carretera LM-116 se encuentran entre las vías más afectadas por movimientos en masa (MM) en el Perú, estas vías están frecuentemente expuestas a la ocurrencia de caídas de rocas, flujos de detritos y deslizamientos. La cantidad y frecuencia de movimientos en masa se hace evidente al realizar un análisis de densidad tomando como datos de entrada dos grupos de datos importantes: la red vial de todo el Perú (compuesta por 144.499 km) y el inventario de peligros geológicos elaborado por el Servicio Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú INGEMMET (2000-2018).

La carretera LM-116 y la ruta nacional PE-22 (Carretera Central del Perú) son vías que enlazan Lima y el sector central del Perú, particularmente, la carretera LM-116 representa una alternativa importante de conexión entre Lima y el departamento de Junín, observándose en su recorrido diversos accesos que conducen a centros poblados, zonas arqueológicas y paisajes geológicos característicos de la cordillera de los Andes. En este estudio se ha realizado la evaluación de la susceptibilidad a MM en la carretera LM-116 utilizando datos de libre acceso reportados por instituciones peruanas (INGEMMET, Ministerio de Transportes y Comunicaciones y el Ministerio del Ambiente), a partir de los cuales fue posible la elaboración de los mapas temáticos que incluyen a los factores más influyentes en la ocurrencia de MM, tales como pendiente, litología, geomorfología, uso de suelos, densidad de drenaje, y distancia a las estructuras tectónicas. Para el análisis de la susceptibilidad se han considerado tres de los métodos más utilizados en la práctica, como son el análisis jerárquico (AHP, Analysis Hierarchical Process), el índice estadístico (Wi, Statistical Index method), y los pesos de evidencia (WoE, Weights of Evidence). La validación de las metodologías utilizadas fue realizada utilizando el área bajo la curva de éxito (AUC, Area Under the Curve). A partir de este análisis se concluyó que los mapas elaborados con la metodología de pesos de evidencia (WoE), presentan una mejor aproximación de los sectores susceptibles a movimientos en masa respecto a la base de datos de peligros geológicos reportada por INGEMMET.

2. Introducción

De acuerdo con los datos registrados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC, 2016), el Perú cuenta con una red vial de 144.499 km de longitud, de los cuales 26.706 km corresponden a la red vial nacional, 4.406 corresponden a la red vial departamental y 113.387 km pertenecen a la red vecinal. En los últimos 19 años, según el inventario del Sistema de Información Geográfico y Catastral Minero del Perú (GEOCATMIN), se han registrado más de 25.000 movimientos en masa en todo el país, muchos de estos eventos han afectado directamente a las vías; resaltando que solamente durante la ocurrencia del fenómeno El Niño Costero del año 2017 se registraron 18.089 km de carreteras destruidas y/o afectadas (INDECI, 2017).

Una medida importante para la comprensión del medio físico y la reducción de pérdidas por movimientos en masa es la zonificación de susceptibilidad del territorio. En general la predicción de la ocurrencia de un potencial deslizamiento se representa en un mapa de susceptibilidad (Mezughli et al., 2012). Estos mapas predicen espacialmente deslizamientos considerando las causas de eventos anteriores (Guzzetti et al., 1999).

En literatura técnica existe una gran variedad de enfoques metodológicos para el desarrollo de mapas de susceptibilidad en diferentes escalas, los cuales han servido de base para la elaboración de guías e incluso para la generación de normas en diferentes países (Corominas et al., 2013). Los enfoques semicuantitativos generalmente se basan en la ponderación y calificación de los factores que condicionan la ocurrencia de deslizamientos (Ayalew, 2004), uno de los métodos más utilizados de ponderación es el método de análisis jerárquico, el cual ha sido aplicado con éxito para la elaboración de mapas de susceptibilidad, por ejemplo Ahmed (2014), Ruff et al. (2008), Meena et al. (2019) y Shahabi et al. (2014).

En el Perú, entidades estatales como el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) han desarrollado mapas de susceptibilidad a escalas regionales (1:50.000 - 1:100.000), teniendo como marco de acción cuencas hidrográficas o los límites del país, como resultado se ha elaborado el "Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú" publicado en el año 2010

3. Área de estudio

Para realizar el estudio de aplicación y comparación de las metodologías descritas anteriormente, se ha considerado la carretera LM-116, la cual conecta a las localidades de Santa Eulalia (Lima) y Marcapomacocha (Junín), ubicado en el flanco occidental de los Andes Peruanos. La carretera pertenece a una de las 29 rutas del departamento de Lima, la cual está clasificada como una red vial departamental y tiene una longitud de 85.258 km.

La zona en estudio se encuentra dentro de la subcuenca Santa Eulalia, con temperaturas medias entre los 11°C y los 25°C, y precipitaciones anuales entre 60 mm y 800 mm con picos entre diciembre y marzo. Geomorfológicamente el área corresponde a relieves montañosos y colinas modeladas en rocas volcánicas y volcano-sedimentarias afectadas por fallas, plegamientos y fracturas superficiales de edades entre el Cretáceo y el Terciario, los cuales contrastan con relieves suaves en el fondo del valle asociados a los depósitos cuaternarios (Palacios et al., 1982; Salazar, 1983).

4. Base de datos y métodos

El primer paso para la elaboración de un mapa de susceptibilidad es la construcción de una base de datos espacial que incluya los factores condicionantes más relevantes en la ocurrencia de deslizamientos (Arsyad et al., 2019). En este capítulo se presentan los datos de entrada empleados para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, esta información incluye el inventario de MM y los datos con los que se elaboraron los mapas temáticos de pendientes, litológico, geomorfológico, uso de suelos, densidad de drenaje y distancia a las estructuras tectónicas.

En este estudio se emplearon tres metodologías: el Método de análisis Jerárquico (AHP) y las metodologías estadísticas Índice Estadístico (Wi) y Pesos de evidencia (WoE).

4.1. Inventario de movimientos en masa

Los inventarios de movimientos en masa son considerados el primer acercamiento a los mapas de susceptibilidad y amenaza, ya que establecen la distribución espacial de los movimientos en masa que han ocurrido en el pasado, y en muchos casos a partir de las características morfológicas puede establecerse las causas de su ocurrencia (Mendoza, 2017). El inventario de movimientos en masa utilizado en esta investigación está constituido por 200 puntos georeferenciados que pertenecen a la recopilación de procesos geológicos ocurridos y documentados en los principales estudios geodinámicos y de peligros geológicos recabados por el INGEMMET entre los años 2000 y 2018 y registrados en la base de datos GEOCATMIN.

Uno de los sectores con mayor densidad de MM, tales como caídas de roca, deslizamientos y flujos de detritos se ubica entre las progresivas km 12+000 y km 20+000 de la carretera. Otros eventos importantes de la misma tipología también han sido inventariados a la altura de la progresiva km 29+000 y las progresivas 34+000. Hacia el final de la carretera a partir de la progresiva km 80+000 (parte alta de la cuenca del Río Santa Eulalia), la distribución de los movimientos en masa es menor, se caracterizan por estar ubicados, generalmente, encima de los 4.000 msnm, su ubicación se asocia a zonas periglaciares y glaciares ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Santa Eulalia.

4.2. Parámetros que intervienen en el cálculo de susceptibilidad a movimientos en masa

La zona donde se encuentra la vía LM-116 presenta un conjunto de variables propias que responden a la ocurrencia de los movimientos en masa, como la pendiente del terreno, la litología, la geomorfología, el uso de suelos, la distancia a las estructuras tectónicas y la densidad de drenaje los cuales se representan en los mapas temáticos.

4.3 Métodos

Considerando el alcance de esta investigación se desarrollaron y se compararon tres metodologías para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa en la carretera LM-116: el Análisis Jerárquico (AHP) y dos métodos estadísticos bivariados: el Índice Estadístico (Wi) y Pesos de la evidencia (WoE).

4.3.1. Método de Análisis Jerárquico (AHP)

El método AHP o Proceso de Análisis Jerárquico (Analytic Hierarchy Process – AHP) consiste en la creación de una jerarquía de decisión de prioridades, en donde los diferentes factores que influyen en la toma de decisiones son organizados jerárquicamente y comparados entre sí, a través de la organización de matrices de comparación pareada (Saaty, 1987).

Para llevar a cabo la aplicación de este análisis, se elaboró una matriz de jerarquización analítica para cada una de las clases que componen los factores condicionantes de los MM, este primer análisis sirvió para desarrollar un conjunto de pesos de cada parámetro y partir de ese punto crear rásteres temáticos: pendiente, unidades litológicas, unidades geomorfológicas, uso de suelo, densidad de drenajes y distancia a las estructuras tectónicas.

4.3.2. Método del índice estadístico (Wi)

En los análisis estadísticos de susceptibilidad por Movimientos en masa se combinan factores que han generado los MM en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. De esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de Movimientos en masa donde existen condiciones similares (González, 2015).

El análisis consiste en comparar el número de MM por unidad de área para cada variable (densidad de clase) de los mapas temáticos, con respecto al número de todos los MM por unidad de área para toda la zona de estudio (densidad total). El resultado obtenido se presenta en términos del logaritmo natural de dicha relación. La comparación entre las diferentes variables se realiza según la siguiente ecuación sugerida por Çevik et al. (2003).

$$W_i = \ln (\text{Den Clase}/\text{Den Mapa}) = (\text{Área}(S_i) / \text{Área}(N_i)) / (\sum \text{Área}(S_i) / \sum \text{Área}(N_i))$$

Donde:

Wi= Peso calculado para cada clase de un factor

Ln= Logaritmo natural,

DenClase=Densidad de MM por clase de una variable determinada

DenMapa= Densidad de MM en todo el mapa

Área (Si)= Área del MM contenido en una clase para una variable determinada,

Área (Ni)= Área total de la clase para una variable determinada.

4.3.3. Método del pesos de la evidencia (WoE)

El método estadístico bivariado (WoE) está basado en la teoría de la probabilidad bayesiana, donde se analiza la relación entre dos sucesos (Sujatha et al., 2012). En el caso de los modelos de susceptibilidad a Movimientos en masa, se evalúa la relación de las áreas afectadas por los MM y la distribución espacial de los factores condicionantes del terreno (Van Westen et al., 2002). Los pesos asignados a cada clase pueden ser pesos positivos (W+) y negativos (W-). Los pesos positivos (W+) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los MM y su magnitud indica su correlación. El peso negativo (W-) indica la ausencia de la clase. En caso de ser cero, indica que la clase analizada no es de interés para el MM. Los pesos son definidos con las siguientes fórmulas

$$Wi+ = \ln \left(\frac{(Npix1)/(Npix1+Npix2)}{((Npix3)/(Npix3+Npix4))} \right) \quad Wi- = \ln \left(\frac{(Npix2)/(Npix1+Npix2)}{((Npix4)/(Npix3+Npix4))} \right)$$

Donde:

Npix1= Número de píxeles con movimientos en masa en la clase

Npix2= Número de píxeles con movimientos en masa que no están presentes en la misma clase

Npix3= Número de píxeles en la clase donde no existen movimientos en masa

Npix4= Número de píxeles en la clase donde no existen movimientos en masa y que no está presente en la misma clase.

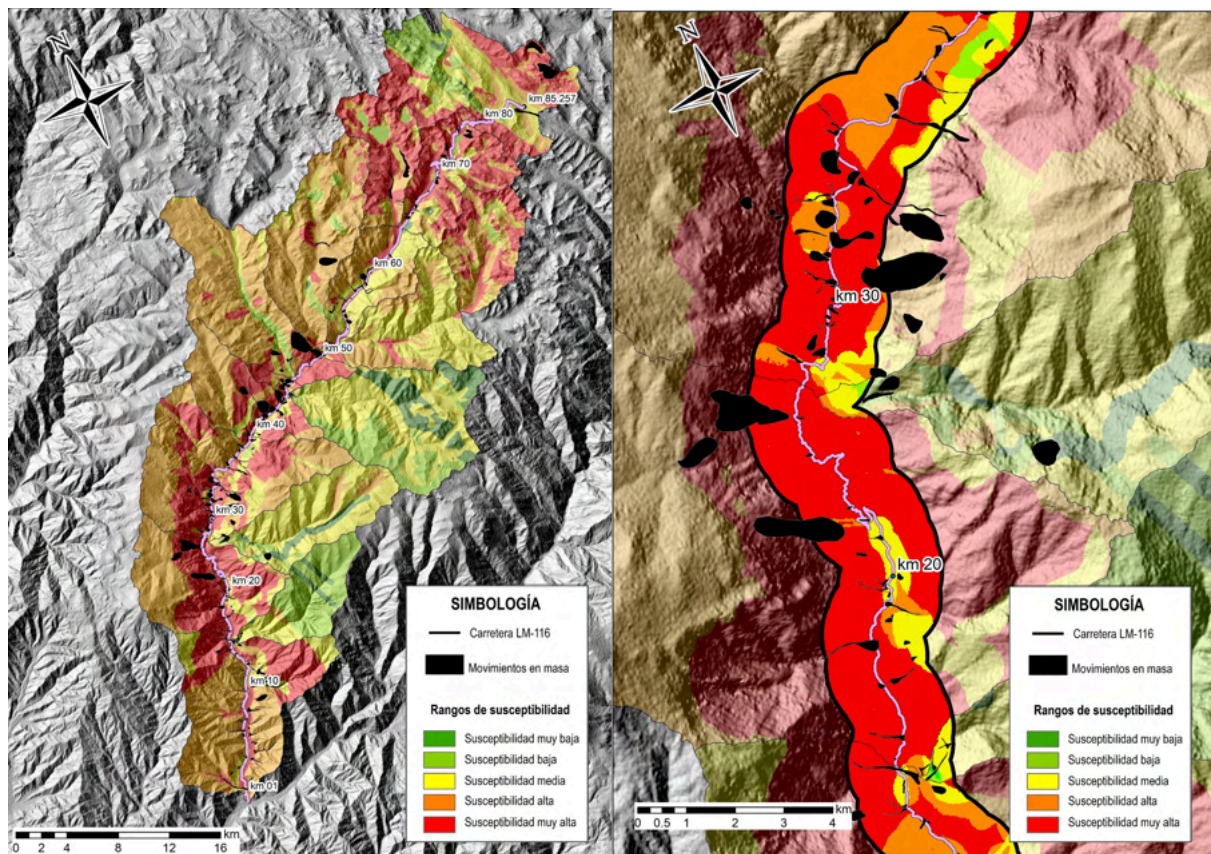
Los pesos de evidencia $Wi+$ y $Wi-$ se deberán calcular para cada variable, entonces, se estima el Peso de contraste o Peso final (Wf) con la siguiente fórmula: $Wf = Wi+ + Wi-$

Donde: $Wi+$ = Pesos positivos (Indicador de la importancia de la presencia del factor), $Wi-$ = Pesos negativos (Indicador de la importancia de la ausencia del factor), Wf = Valor del peso de la evidencia (Peso del factor).

4.4.4. Validación de los mapas de susceptibilidad

Para medir la bondad de representación de los mapas de susceptibilidad, se construyeron las curvas de éxito para cada modelo, estas curvas relacionan el porcentaje de píxeles acumulados de MM, respecto al porcentaje acumulado de los valores de los índices de susceptibilidad en la zona donde se desarrolla la carretera LM-116.

Las curvas de éxito miden la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los MM inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de IS en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías (Dahal et al, 2008).



Aproximación al modelo de susceptibilidad 4 realizado con la metodología WoE. Se observa que en el sector ubicado entre las progresivas km 14+000 - km 36+000 presenta áreas de muy alta susceptibilidad

Estas curvas se construyeron en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados. Una vez construida la curva se evaluó el AUC, para establecer la calidad de ajuste de los datos, cuanto más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el AUC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de los MM. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70% (SGC, 2017).

Las categorías de susceptibilidad se establecieron a partir de la curva de éxito tomando en cuenta los criterios tomados de Van Westen et al. (2008), se tomó en cuenta el número de MM, la mayor densidad de MM por porcentaje y por unidad de área.

5. Resultados

Como resultado de las tres metodologías aplicadas, se obtuvieron 6 mapas de susceptibilidad a MM, estos mapas zonifican los sectores propensos o con tendencia a ser afectados por movimientos en masa, no consideran las áreas que puedan ser alcanzadas por estos procesos (áreas de depósito) debido a la representación cartográfica de los datos del inventario y a los objetivos de la investigación.

Los modelos 1 y 2 se realizaron aplicando el método AHP, el primero incluyó el análisis de factores condicionantes convencionales como la litología, la geomorfología, el uso de suelo y las pendientes. El segundo modelo reorganizó el análisis de los mapas temáticos y adicionó variables específicas como la densidad de drenaje y la distancia a las estructuras tectónicas.

A partir de los resultados de la aplicación del método de análisis jerárquico (AHP), Índice estadístico (W_i) y el Peso de la evidencia (W_oE), se determinó que el Modelo 6 es el más adecuado para la zonificación de las áreas susceptibles a MM, debido a que obtuvo un mayor éxito en el proceso de validación con respecto a los demás mapas. A partir de ese resultado se efectuó el análisis espacial de la susceptibilidad a varios tramos de la vía LM-116; este proceso ha permitido verificar que las zonas con susceptibilidad alta y muy alta se encuentran en tres sectores bien diferenciados, correspondientes a las progresivas: km 14+000 - km 36+000, km 39+000 - km 51+000 y km 66+000 - km 80+000.

De otro lado en el Modelo 6, el 40% de los MM se encuentran ubicados en zonas de muy alta susceptibilidad y el 47% de los MM se ubican en las áreas de alta susceptibilidad. Estos porcentajes son buenos indicadores, según los criterios.

6. Discusión

Analizando comparativamente los modelos que obtuvieron los mejores resultados en la curva de éxito (modelo 4 y modelo 6) con relación a los modelos que obtuvieron menores porcentajes (modelo 1 y modelo 2) se evidencia que la metodología a partir de la cual se construyeron los modelos de susceptibilidad condiciona los resultados de los valores de los índices de susceptibilidad. En el caso de los modelos 1 y 2 se utilizó la metodología (AHP) estos modelos obtuvieron valores menores al 70% en área bajo la curva, lo cual indicaría que las metodologías basadas en las opiniones del experto podrían tener criterios subjetivos.

También se evidenció que existe un cambio en el porcentaje de zonas con susceptibilidad muy alta obtenido en los modelos 4 (W_i) y 6 (W_oE). No obstante, el modelo 4 y el modelo 6 presentan la efectividad espacial a la que debería estar sujeta un modelo de susceptibilidad ya que representa los sectores en donde hay evidencias de la ocurrencia de MM.

7. Conclusiones

Las metodologías que mejor se ajustan a la evaluación de susceptibilidad a MM son las metodologías estadísticas, estas demostraron ser eficientes y lograron un buen desempeño en las curvas de éxito en comparación con la metodología AHP. Los porcentajes alcanzados en el área bajo la curva por las metodologías Índice estadístico W_i y Pesos de evidencia W_oE superaron el 70%. Esto confirma que los métodos estadísticos bivariados representan una herramienta adecuada en la evaluación de la susceptibilidad a MM, aportando procedimientos objetivos y cuantitativos para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Las metodologías multicriterio como el análisis jerárquico AHP, son una herramienta práctica para la evaluación de la susceptibilidad a MM, este tipo de evaluación puede ser empleado como un análisis referencial cuando no se cuente con datos suficientes para elaborar un modelo estadístico.

Palabras Clave: susceptibilidad, movimientos en masa, obras lineales, pesos de la evidencia.

Referencias:

- Ahmed, B. (2014) Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12 (6), 1077- 1095. (2014).
- Aristizabal, E., Vásquez, M. and Ruiz, D. (2019) Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa. (*Tecnológicas*, 22(46), 39-60. Arsyad, A. and Hamid, W. (2020): Landslide susceptibility mapping along road corridors in west Sulawesi using GIS/AHP models, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 419(1), 012080.
- CENEPRED (2014) Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales – 2da Versión. Centro Nacional de Estimación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales-CENEPRED, 245 p.
- Çevik, E., Topal, T. (2003) GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Earth Sciences* 44(8):949-962.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopolou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winger, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. and Smith, J.T. (2013) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209–263.
- Dahal, R., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. and Paudyal, P. (2008) Predictive modelling of rainfall induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3-4), 496-510.

Evaluación del impacto de la deforestación en la probabilidad de deslizamientos en la interfaz urbano-forestal: El caso de la cuenca de Palomares en el Área Metropolitana de Concepción

Emiliano Tomás Vega Ruiz¹⁻², Edilia Jaque Castillo¹⁻², Alfonso Fernández Rivera¹, Ianire Galilea Salvador¹⁻²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(2) Grupo de Estudios Multiamenazas, Vulnerabilidades y Cambio Climático VRID 2021000383MUL, Universidad de Concepción

Chile se enfrenta a diversos y mixtos peligros naturales debido a su combinación única de características geográficas, geológicas, climáticas y antrópicas. En el Área Metropolitana de Concepción, los deslizamientos de suelo inducidos por lluvias son uno de los peligros más recurrentes y destructivos, causando la muerte de al menos 17 personas desde 1980 y ocasionando grandes pérdidas económicas en bienes materiales e infraestructura. La cuenca de Palomares, ubicada en el límite exterior de Concepción, es una urbanización ubicada en los pies de colinas formadas por rocas graníticas paleozoicas de la Cordillera de la Costa, cubiertas de plantaciones forestales exóticas, delimitando una zona de convivencia entre comunidades con vegetación denominada interfaz urbano-forestal (IUF) que combina tanto el riesgo de incendios forestales (por ejemplo, los de 2017 y 2023) como de deslizamientos de suelo, debido a la pérdida de cobertura vegetal y al aumento subsiguiente de la erosión, representando un nuevo tipo de problemática territorial y el foco de este estudio: la evaluación de los efectos de la deforestación en la generación de deslizamientos de suelo residual dentro de la IUF.

Esta área fue elegida porque representa un escenario común y distintivo observado en gran parte de la región. La combinación de las características naturales intrínsecas del área, tales como la presencia de suelos bien formados de regolitos graníticos ("maicillo"), pendientes pronunciadas y lluvias de alta intensidad, junto a factores sociales, demográficos y económicos, como la ocupación de áreas marginales relacionadas con las colinas en zonas peligrosas debido a la segregación socioeconómica, planificación territorial insuficiente, y aumento antrópico de los factores condicionantes de los deslizamientos relacionados con la deforestación, generan un ambiente propicio de alta susceptibilidad de deslizamientos del suelo residual, producto de la disminución de las propiedades mecánicas del suelo y la pérdida de cohesión de las raíces debido a los ciclos consecutivos de cosecha y los incendios forestales.

Para poder evaluar el impacto de la deforestación, se simularon escenarios de pre y post-deforestación utilizando el software STEP-TRAMM. Los datos de entrada fueron un evento de lluvia de 2019 con registros cada 30 minutos, profundidad del suelo (m), elevación (m, con píxeles de 0,2 m² y 12,5 m² para una sola ladera y toda la cuenca, respectivamente), clase textural del suelo, ángulo de fricción (°), inventario de deslizamientos (trabajo de campo y teledetección), saturación inicial del suelo (SIS), resistencia de las raíces (Pa), cohesión del suelo (Pa) y presencia/ausencia de cobertura vegetal (tele-detección de escenarios de pre y post-deforestación e identificación en terreno). Con los datos de entrada, el software cuantifica la probabilidad y dimensiones espaciotemporales de los deslizamientos de suelo teniendo en cuenta la pérdida/ganancia mecánica de la cohesión del suelo proporcionada por las raíces de los árboles. Luego, se validan los escenarios con el inventario de deslizamientos y se comparan para cuantificar los efectos de la deforestación.

Se determinó que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de suelo aumenta en condiciones de deforestación, donde el escenario post-deforestación muestra hasta 3 y 5 veces más deslizamientos de suelo generados y áreas afectadas (m²), respectivamente. A escala de la ladera estudiada, más del 65% de los deslizamientos simulados coinciden con el inventario de deslizamientos e inestabilidad identificado a partir del evento de precipitación de 2019, mientras que para la totalidad de la cuenca, gran parte de los deslizamientos coinciden con el inventario y además a zonas que históricamente han sufrido deslizamientos y que actualmente presentan una cubierta vegetal las que son "develadas" por esta herramienta. Las simulaciones a escala de una sola ladera sugirieron que los niveles de SIS entre 0,5 y 0,75 son los más adecuados para la generación espacial, temporal y volumétrica de deslizamientos de tierra, con una pequeña diferencia de tiempo entre el escenario simulado y el real. A escala de toda la cuenca, las simulaciones se interpretaron como áreas potenciales a generar deslizamientos de tierra, donde se registraron deslizamientos de suelo reales dentro de estas zonas.

Se concluye que, bajo un mismo evento de precipitación, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de suelo aumenta en condiciones de deforestación, incrementando el riesgo para la población expuesta debido a la combinación de una planificación urbana insuficiente, prácticas forestales invasivas y la susceptibilidad inherente de las pendientes habitadas a los deslizamientos de suelos.

Palabras Clave: Landslides, Deforestación, Biobío, Construcción social del riesgo.

Referencias:

- Jaque, E.; Merino, C. y Lara, A. (2017). Fortaleciendo el uso de los instrumentos de planificación urbana, para la gestión de riesgos. Ciudad de Coronel, Región del Biobío. Revista INVI, 32, (90). N°90 ISSN 0718-8358, SCIELO - SCOPUS.
- Lehmann, P., von Ruette, J., & Or, D. (2019). Deforestation effects on rainfall-induced shallow landslides: Remote sensing and physically-based modelling. Water Resources Research, 55(11), 9962-9976.
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. EURE (Santiago), 27(81), 97-122.
- Martín, L. G. (2012). Las interfaces urbano-forestales: un nuevo territorio de riesgo en España. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.
- Naranjo, J. (2018). Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). SERNAGEOMIN (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile.
- Von Ruette J., P. Lehmann, and D. Or (2013). Effects on rainfall spatial variability and intermittency on shallow landslide triggering patterns at a catchment scale, Water Resources Research, 50, (10), 7780-7799, DOI: 10.1002/2013WR015122.

Índice de Conectividad para el diagnóstico de la amenaza aluvional en el Valle del Huasco

Bruno Villela Ramirez¹, Germán Aguilar Martorel¹, Alex Garcés Catalan¹, Santiago Monserrat Michelini¹

(1) Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

La hidrología de la cuenca del Huasco se caracteriza por quebradas de escorrentía efímera e intermitente, y por la escorrentía permanente de los ríos El Tránsito y El Carmen. Geológicamente abundan litologías volcánicas que al fragmentarse por intemperismo favorecen la disponibilidad de sedimentos. Dicha disponibilidad también es favorecida por: i) la escasa escorrentía superficial durante largos periodos de tiempo que restringe la transferencia y evacuación de los sedimentos contenidos en las quebradas, y ii) la presencia de cauces con baja conectividad que disminuye el transporte de los sedimentos y favorecen su almacenaje durante periodos inter tormentas. Estas condiciones son propicias para desarrollar grandes reservorios de sedimentos que implica una disponibilidad casi ilimitada de sedimentos al interior de las quebradas. La condición ilimitada de sedimentos implica un peligro potencial de transferir grandes volúmenes de sedimentos como flujos de aluviones durante tormentas de lluvias extremas (Aguilar et al., 2020).

En la problemática de las condiciones de activación de flujos aluvionales, alcance y potencial destructivo, y su respectiva recurrencia, es que el *Advanced Mining Technology Center* (AMTC) de la Universidad de Chile, en un trabajo conjunto con Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) diseña y desarrolla una metodología para la evaluación de amenaza de aluviones presente y futura para las quebradas del Norte de Chile. Para esto, se aborda de forma interdisciplinaria el estudio de cuencas áridas: hidráulicamente, caracterizando las cuencas respecto a modelos hidrogeológicos y balances hídricos; meteorológicamente, identificando las líneas de nieve, instalando sensores de temperatura y precipitaciones, y con modelos de cambios climáticos escalados a las quebradas; y geomorfológicamente caracterizando las cuencas desde el potencial de erosión, transferencia y aportes de sedimentos al flujo aluvional.

Abordamos la dinámica de transferencia de sedimentos, caracterizando el potencial que tiene un determinado punto de la cuenca para transferir sedimentos hacia un punto de drenaje. Esto es denominado índice de Conectividad (IC; Borselli et al. 2008; Cavalli et al. 2013; Zingaro et al. 2019). Para el cálculo se utilizan ponderaciones de parámetros como pendiente, distancia hasta un punto de drenaje, características geológicas, y precipitaciones del evento, impedancia del sedimento, y algunos incluyen la rugosidad del suelo. Este trabajo relaciona la distribución de cauces con baja conectividad dentro de las quebradas con la variabilidad de los volúmenes de sedimentos transferidos hacia los puntos de drenaje que constituyen abanicos aluviales. Las quebradas en estudio son aquellas que tributan e interceptan los ríos El Tránsito y El Carmen, en la comuna de Alto del Carmen. En este sector fueron medidos los volúmenes de los abanicos aluviales producidos por los flujos de detritos generados durante la tormenta de marzo de 2015 (Aguilar et al., 2020). Esta tormenta generó un aumento de 20 a 25 veces la cantidad de precipitación media normal esperada para el mes de marzo y detonó aluviones de gran magnitud y perjuicios cuantiosos para la Región de Atacama.

Los análisis permitieron reconocer que la impedancia del suelo, y la forma en que este se clasifica y categoriza juegan un rol fundamental en el IC, pudiendo variar los resultados de modo significativo, por este motivo, el IC que propone Cavalli et al. (2013) presenta resultados superiores al resto de los IC. Por otra parte, fue posible relacionar la cantidad y extensión de segmentos de cauces con bajos índices de conectividad dentro de las quebradas con la activación de flujos de detritos y su depositación en abanicos aluviales (punto drenado). Se interpreta que esta correlación se debe a que quebradas con cauces bien conectados transportan de manera más rápida y eficiente los sedimentos, por lo que no presentan sedimentos acumulados en sus laderas y canales que potencialmente se transfieran durante tormentas extremas como flujos de detritos. En estas cuencas sólo se generan flujos con menor concentración de sedimentos (flujos de corrientes e hiper-concentrados).

Por el contrario, las cuencas con abundantes y extensos cauces que poseen una baja conectividad tienen un gran potencial de contener reservorios de sedimentos en sus canales, las que, frente a tormentas extremas, tienen mayor capacidad de transferir grandes volúmenes de sedimentos y generar flujos de detritos que alcancen los abanicos aluviales situados en las uniones con los ríos principales.

Palabras Clave: aluviones, índice de conectividad, Desierto de Atacama, Disponibilidad de sedimentos.

Agradecimientos: Este trabajo es financiado por el proyecto FONDEF ID22110122.

Referencias:

- Aguilar G., Cabré, A., Fredes V., Villela, B., 2020. Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flows generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1247–1265.
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena* 75, 268–277.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphol.* 188, 31–41.
- Zingaro, M., Refice, A., Giachetta, E., D'Addabbo, A., Lovergine, F., DePasquale, V., Capolongo, D., 2019. Sediment mobility and Connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Sci Total Environ.* 672, 763–775.

Combined Probability of Mass Wasting Prediction Triggered by Earthquakes and/or Intense Rainfall

Felipe Aron¹⁻²⁻⁵⁻⁶, Erik Jensen¹⁻³⁻⁵, Gabriel Candia¹⁻⁴, Esteban Sáez¹⁻², Francisca Roldán¹⁻³, Alex Zúñiga¹⁻³, Gabriel González¹⁻³

(1) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(4) Universidad del Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Las Condes, Santiago, Chile

(5) *These authors contributed equally to this work

(6) *Now at Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Predicting fast mass wasting processes such as landslides is often challenging because of their apparently random occurrence and complex non-linear interactions between in-situ and conditioning parameters. Traditional analysis using susceptibility maps have shown to be a useful tool for identifying parts of the territory that could be more prone to generate such types of processes. They are mainly based on semi-quantitative in-situ parameters such as terrain slope, soil/rock composition and structure, vegetation cover, proximity to relevant geologic faults, among others, weighted according to their relative importance to triggering those events. However, the time probability of reaching a certain intensity of the triggering factors that would cause hillslope failure for a given set of terrain properties, i.e. when and how often they may occur, is generally missing in mass wasting hazard assessments. Such types of quantitative hazard evaluations are a crucial input for engineering design and urban planning. Here we propose a novel methodology to estimate the combined probability of earthquake- and rainfall-induced landslides based on the terrain susceptibility, empirical and modeled historical records of rockfall and landslides, and seismic ground motion modeling. We apply this technique to the Maipo River basin in the Chilean Metropolitan region, which hosts more than one third of the country's population and most of its critical infrastructure. Here mass wasting events occur more frequently than the rest of the territory, making this one of the most vulnerable areas to these types of hazards in Chile.

The activation of mass wasting processes requires the action of other natural phenomena, such as seismic ground shaking and intense rainfall, in intensities sufficiently high to mobilize the strength of the slopes in regions of relatively steep terrain. This implies that mass wasting processes are concatenated hazards because their occurrence depends on the action of other natural hazards and the cascading events that result from their interaction. Our methodology consisted of four steps. First, we constructed susceptibility maps to assess the in-situ conditions to generate mass wasting. Then we determined thresholds of intensity for both ground shaking and precipitation, to activate hillslopes and trigger mass wasting based on an empirical approximation using historical catalogs. For the case of earthquake-induced mass wasting, we used published inventories of landslides triggered by the 2010 Maule earthquake in the study area and computed the horizontal peak ground acceleration (PGA_h) [m/s²] experienced by the affected locations during this earthquake, using a novel technique to estimate seismic site amplification. With that, we estimated an empirical function relating PGA_h with the susceptibility value on the catalog sites and used this function to map a grid of the study area of PGA_h thresholds based on the susceptibility. In the case of rain-induced mass wasting, we used the historical 1979-2020 CR2MET precipitation model of Chile and the most comprehensive catalog of rock fall and landslides events triggered by intense rain for the area, to estimate maximum daily precipitation values [mm/24hrs] at the catalog sites and dates necessary to trigger these events. Similarly to the earthquakes, we estimated an empirical relation between susceptibility and daily precipitation in the affected area, and used that to map a grid of rainfall thresholds on the Maipo basin. After estimating the threshold grids, we used a standard probabilistic seismic hazard model for PGA_h, and a Poisson distribution with the frequencies of exceedance of precipitation thresholds in the past estimated from the CR2MET model, to compute grids of probabilities of exceedance of those intensities at 1, 10, 50 and 100 years time windows of observations. Finally, we calculated the combined probability of occurrence of mass wasting events in these time windows, triggered either by earthquakes or intense rainfall.

Our results reveal that vast portions of the Maipo basin have a high probability of experiencing mass wasting events in the next 10 years, particularly in the high mountainous areas of the upper part of the basin. Our proposed method could become a powerful tool to obtain quantitative estimations of mass wasting hazards, considering the concatenated action and cascading effects of combined triggering factors, which can be easily tested, modified and improved as more empirical evidence and comprehensive catalogs become available.

Keywords: Earthquake-induced mass wasting, Rain-induced mass wasting, Combined probability of exceedance, Concatenated hazards, Maipo River basin Chile.

Financing: FONDEF-ID19I10021, ANID, Chile (2020 – 2021).

Catastrophic events in the stratigraphic record along the coast of Central Chile (~33°S)

Ximena Contardo-Berrios¹, Cristian Rodrigo Ramírez¹, Camilo Acuña¹, Joaquín Casciola Encina¹, Sebastián Espinoza¹

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

The subduction zone of central Chile, associated with the segmentation of the Andean orogen (~27° to 33°S), represents a significant change defined by the presence of the Juan Fernandez Ridge (JRF), an inactive volcanic chain of > 3 km elevation and up to 20 km wide with orientation N80°E. This prominent feature controls the subduction erosion which defines morphostructures of the submerged margin and the dominant normal faults with NE and NW orientation.

Along the coast of central Chile (~33°S), paleotsunami deposits (tsunamite) and their associated paleo earthquake (seismite), provide stratigraphic evidence of past seismic activity. These outcrops are identified northeast to caleta Horcón along the coast, at the limit between the lower and upper members of the Horcón Fm. (Miocene-Pliocene) which represent abrupt changes in sedimentation environments, with the transition from marine sequences (inner shelf) to transitional environments.

The tsunamite facies are characterized from the bottom to top, by a layer of conglomerates and breccias centimetric to metric, covered by a sequence of conglomeratic sandstones. The upper layer of about 30-40 cm is characterized by a high proportion of well-preserved *Turritellas* without preferential orientation. The seismite facies are located at the base of the sequence (lower member), characterized by a slip surface defined by an intraformational breccia, on which north-verging slump structures are identified. This surface is associated with a N80°E/45°W normal fault, covered by the tsunami deposit.

Geophysical methods, such as seismic tomography, have identified hidden (strike-slip) faults under dune deposits covering marine terraces. In addition, the mapping of active normal faults affecting the retreat of the coastal cliffs located to the NE of caleta Horcón, highlights the vulnerability of the area.

Observations of recent tsunami deposits show important landslide processes that occurred shortly after the tsunami process (coastal deposits NE of Horcón), while in other places (mouth of the Aconcagua River, in Concón) evidence of flows of mud at both the bottom and top of the tsunami deposits.

A better identification and understanding of the tsunami deposits and paleoearthquake in the geological record, as well as the mechanisms that generated them, is of great relevance for the study of subduction margins. Furthermore, a better identification and chronology of associated processes such as mass wasting and mud flows is crucial to predict their impact and vulnerability on coastal regions.

Keywords: paleo tsunami deposits, high-energy events, recent tsunami record, mass wasting, mud flow deposits.

References:

- Carrillo, B. (2011) Significado paleoambiental y paleoecológico de la fauna marina del Plioceno de la Formación Horcón, Región de Valparaíso, Chile central. Tesis, págs. 106-119.
- Morton, R.; Gelfenbaum, G.; & Jaffe, B. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200: 184-207.
- Nishizawa, A.; Shanmugam, G. (2012). Process-sedimentological challenges in distinguishing paleo-tsunami deposits. *Natural Hazards*, 63, (5-30).
- Espinoza, S. (2022). Facies tsunamigénicas en el límite marino transicional de la FM Horcón, evidencia de paleo terremoto inducido por la subducción del JFR a los 33°S, Valparaíso, Chile. Tesis para optar al título de geólogo. Repositorio Institucional, Universidad Andrés Bello.
- Acuña, C. (2023). Control estructural y geometría de fallas activas, asociadas a erosión por subducción y su potencial peligrosidad entre los 32°–33° S, Valparaíso, Chile. Tesis para optar al título de geólogo. Repositorio Institucional, Universidad Andrés Bello.
- Casciola (2023). Evidencias e implicancias paleoambientales de paleo terremoto y tsunami en el límite marino transicional de la formación horcón entre los 32°40' y 32°42'S. Tesis para optar al título de geólogo. Repositorio Institucional, Universidad Andrés Bello.

New approaches for tsunami hazard estimation: numerical modeling and machine learning

Juan González¹⁻², Damián Bahamondes¹, María Francisca Bosco¹, Christopher Castro³

(1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Escuela de Ciencias del Mar, Av. Universidad 330, Curauma, Valparaíso, Chile

The series of tsunamigenic earthquakes occurred between 2010 and 2015 in the Pacific basin (e.g. Mw 8.8, Maule, Chile; Mw 9.0, Tohoku-Oki, Japan; Mw 8.1, Iquique, Chile and Mw 8.4, Illapel, Chile) constitutes a major turning point to the tsunami hazard scientific efforts, as they give clues to highlight the relevance of the seismic source complexity and the inundation local effects caused by resonance processes and coastal geomorphological features. Otherwise, major tsunamigenic earthquakes are infrequent natural phenomena, being difficult to analyze, due to the scarcity of instrumental data. Recent technical advances have provided scientific solutions to generate large datasets of synthetic tsunamigenic earthquakes, to understand the multiple variables involved in the coastal impact of a tsunami. This contribution exposes the recent advances in tsunami hazard assessment focused on stochastic techniques to generate large sets of plausible tsunamigenic sources as input in numerical simulations to evaluate the first-order geological and hydrodynamic processes involved in tsunami inundation. Three mature seismic gaps were analyzed (Peru-Chile, Atacama, and Central Chile) due to their long-term seismic quiescence since the 1877 Mw 8.7, 1922 Mw 8.5, and 1730 Mw 9.0 respectively. The construction of a tsunamigenic scenarios database was implemented using the Karhunen-Löve expansion stochastic technique, through the generation of a large database of ~1000 non-uniform rupture tsunamigenic scenarios by every seismic gap and focused on a target magnitude range between Mw 8.0 to 9.2. Subsequently, the obtained seismic sources were utilized as input to model the tsunami inundation under a non-hydrostatic scheme of NEOWAVE2D model, to extract high-resolution data for flow depth, sea level records, coastal surface currents, arrival times, and maximum inundation areas. The combined use of novel techniques to construct a large database of earthquake scenarios and high-resolution tsunami modeling can play a relevant role to anticipate more accurately the uncertainty of tsunami inundation measures (e.g. flow-depth, inundation area, runup, and among others) of plausible tsunamigenic scenarios, furthermore revealing the main factors that controlling tsunami inundation processes.

Keywords: tsunami, stochastic, scenarios, machine learning, numerical modeling.

Diagnosis of seismic-tsunami risk using combined fragility curves in Mejillones Bay, Chile

Juan González¹⁻², Joaquín Moris²⁻³, Esteban Saéz²⁻⁴, Gabriel González²⁻⁵, Gonzalo Bravo²⁻³

(1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Norte (UCN), Departamento de Ingeniería Civil, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(4) Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(5) Universidad Católica del Norte (UCN), Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

Worldwide, all oceanic regions have the capacity to experience tsunami events, but the Pacific Ocean basin is an area with a high probability of occurrence due to extensive surrounding subduction zones. The generation of a tsunamigenic event is related to the occurrence of dislocation in oceanic zones, in addition to the capacity to cause vertical movements in the rupture area, generally associated with reverse faulting mechanisms. Major seismic events ($M_w > 8$) occurring in the South American subduction zone extended between 17°S and 23°S constitute a relevant threat to the coastal communities of northern Chile. Under this prism, the increase in the knowledge of the plausible rupture distributions for mega earthquakes is a powerful tool for the evaluation of seismic and tsunamigenic risk. For near-field tsunamigenic events, the spatial distribution of slip is a first-order factor in hydrodynamic processes and coastal impact. Generally, the slip pattern for subduction earthquakes is an unknown parameter, being commonly replaced by uniform distributions of seismic slip estimated from scaling laws, with a high probability of underestimating the hydrodynamic variables associated with tsunami inundation. Due to this problem, stochastic methods using the Karhunen-Löve (K-L) expansion were implemented to generate a set of hypothetical rupture scenarios for a range of magnitudes distributed between M_w 7.5 to 8.8. Stochastic scenarios can decrease the uncertainty in the variables associated with tsunami inundation, improving the estimation of tsunamigenic hazards in the coastal zone. In this context, the combined seismic-tsunami risk assessment is a novel technique with a high potential for optimizing land-use planning processes, as well as civil protection plans and the generation of mitigation measures both in urban areas and in critical coastal infrastructure. The study area is located in Mejillones Bay, Chile, an area of great interest due to the geotechnical properties of the basin, in addition to the extensive seismic and tsunamigenic history, such as the event of M_w 8.7, 1877.

Keywords: earthquake-tsunami, Mejillones, fragility curves, risk assessment, northern Chile.

Exploring the relationship between upper-plate faults and megathrust earthquakes using Coulomb stress analysis

Juan González¹⁻², Joaquín Cortés³⁻⁴, Javiera Orellana¹, Bastián Otárola¹

(1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Universidad de Concepción (UDEC), Departamento de Ciencias de la Tierra, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(4) Núcleo Milenio Ciclo Sísmico en Zonas de Subducción (CYCLO), Sevilla 204, Valdivia, Chile

Upper plate faults are first-order elements of the structural grain in forearcs above subduction megathrusts. Paleoseismic studies have demonstrated that these faults may be seismogenic, capable of producing moderate-to-large earthquakes (Mw 6-7), with recurrences on the order of thousands of years. Despite crustal earthquakes being smaller and less recurrent than those on the underlying megathrust, they may result in severe localized damage for inhabited urban areas. The Coulomb Failure Stress changes (ΔCFS) have been extensively employed to assess earthquake triggering, induced by a mainshock, along a source that will be referred to as the main fault. We have computed the static ΔCFS on upper plate faults, induced by the backslip motion associated with geodetically constrained interplate locking and by real and synthetic megathrust earthquake scenarios. The calculations consider the stress interaction between a main fault and receiver faults, which are treated as dislocations in an elastic half-space. In our analysis, the causative fault is focused on the megathrust geometry. Additionally, the use of stochastic synthetic scenarios provides the possibility to evaluate the uncertainty of the possible activation thresholds of several cortical faults observed in the upper plate of the subduction zone. This contribution explores the causal link between the megathrust seismic cycle and the reactivation of these faults, using ΔCFS imparted on these faults by the megathrust during different seismic stages of the subduction cycle to contribute to the understanding of the seismic potential of crustal faults and their dynamic interaction with the megathrust earthquakes. Initial results in northern Chile demonstrate that the use of synthetic rupture databases provides the possibility to explore in detail the relationship between major earthquakes (Mw 8.8) and the possible reactivation of specific cortical faults. Such analyses suggest that certain faults may experience a greater range of ΔCFS perturbations than others, indicating possible relationships with the rupture patterns of the seismic source.

Keywords: upper-plate faults, coulomb stress, stochastic scenarios, threshold, cascading.

Tsunamigenic hazard in enclosed water bodies: generation by laharc/pyroclastic flow in the Mocho-Choshuenco Volcanic Complex (CVMCh) outflow in Lake Riñihue, Chile

Juan González¹⁻², Ignacio Chinga³, Alfredo Esquivel³⁻⁵, Joaquín Cortés⁴⁻⁶, Felipe Aguilera³⁻⁵, Alejandra Serey⁷⁻⁸, Rodrigo González³⁻⁵

- (1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile
- (2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile
- (3) Universidad Católica del Norte (UCN), Departamento de Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
- (4) Universidad de Concepción (UDECE), Departamento de Ciencias de la Tierra, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile
- (5) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico (CKELAR), Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
- (6) Núcleo Milenio Ciclo Sísmico en Zonas de Subducción (CYCLO), Sevilla 204, Valdivia, Chile
- (7) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile
- (8) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Av. Almirante Blanco Encalada 2200, Santiago, Chile

The generation dynamics of a tsunami event originating by a lahar flow is quite different from that of a co-seismic event and its study is dependent on several parameters, such as volume and density of the flow, horizontal extension of the flow in the water body, depth of the water body in the area of generation and the morphological characteristics of the propagation zone. The origin of a lahar tsunami event is dependent on a volcanic eruption as a triggering phenomenon, which produces an extensive melting of the glacial and snow cover of the volcanic complex analyzed. As a result, a high-velocity debris flow of a larger volume enters a semi-enclosed body of water, generating the propagation of a tsunami in the water column. During the last decade, the study of tsunamis generated by landslides and lahars has reached a significant interest within the international scientific community, due to the severe consequences registered in several coastal communities around the world. The mechanism of generation of these types of events has been underestimated, due to their low probability of occurrence as a cascading hazard process. The simulation of laharc flows will be generated by a combination of VolcFlow and LaharFlow models. Both models have been intensively used by the Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) in the modeling of lahar flows for the estimation of volcanic hazards in the framework of the National Volcanic Monitoring Network. The VolcFlow model has been designed for the simulation of volcanic flows, e.g. determination of the rheological behavior of dense pyroclastic flows and debris avalanches, volcanic hazard estimation, and simulation of lava flows, among others. Additionally, the results obtained by VolcFlow are fed as input to the LaharFlow model, which is a tool for modeling lahar dynamics on a topographic database. The mathematical scheme used is based on the fluid mechanics of shallow flows, fluid and granular dynamics, and morphodynamic processes of erosion and deposition. Initially, for the modeling of the analyzed lahar flows, it was necessary to carry out a bibliographic review of the geology, hazards, risks, and vulnerability associated with the Mocho-Choshuenco Volcanic Complex, as well as to analyze the records of historical and prehistoric eruptive events.

The results for the highest probability scenarios for a lahar flow indicate a maximum displaced volume of 6,352,578 m³ and a maximum velocity of 4.6 m/s in an effusive regime, while a maximum volume of 4,136,310 m³ and a maximum velocity of 4.7 m/s are observed in an explosive regime. For the most dangerous scenarios, a maximum volume of 87,776,000 m³ and a maximum velocity of 10.6 m/s is estimated in an effusive regime. In addition, for the explosive regime, a maximum volume of 39,327,600 m³ and a velocity maximum of 7.8 m/s.

Keywords: tsunami, lahar, pyroclastic flow, enclosed lakes, cascading.

Exploring the suitability of stochastic tsunamigenic scenarios: the case of the Mw 8.8 Maule, Chile, earthquake

Juan González¹⁻², Catalina Díaz¹, Matías Carvajal³

(1) Universidad Andrés Bello (UNAB), Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

(2) Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Instituto de Geografía, Facultad de Ciencias del Mar y Geografía, Avenida Brasil 2241, Valparaíso, Chile

Currently, the use of methodologies based on stochastic seismic scenarios has been significantly extended in tsunami hazard estimation studies. However, there is no significant evidence of the ability of stochastic tsunamigenic scenarios to correctly reproduce real events. The present contribution reports a comparison of a set of stochastic seismic scenarios used as source materials for tsunami simulations versus inundation data acquired after the Maule, Chile Mw 8.8 earthquake by Fritz *et al.*, 2011. From the methodological point of view, K-L stochastic scenario generation and numerical tsunami modeling are used. For the estimation of the accuracy levels of the modeled stochastic scenarios, the methodology based on the Aida number is used, yielding a ~86% similarity of the simulations with the collected inundation data and showing a high degree of similarity of a stochastic tsunamigenic scenario with the original event. It should be noted that the results of the number of Aida per location show significant differences from the information reported by Fritz *et al.*, 2011. Finally, it is possible to determine different sources of error in the estimates (e.g. use of Green's Law, topo bathymetric DEM model resolution, among others), being advisable for future studies to perform sensitivity analyses of these variables. Based on the results obtained, our analysis affirms that the stochastic scenarios are capable of representing the Maule 2010 event. Forty-three scenarios were obtained within the precision ranges of the Aida number, of which seven scenarios are within 30 km of the maximum slip and one scenario whose slip distribution is similar to the original event. This allows concluding that stochastic scenario modeling can generate earthquake sources whose inundation simulations resemble reality by complying with the numerical parameters when compared with data from a real case. Although the uncertainty generated by Green's Law, the data of Fritz *et al.* (2011) and the maximum slip limit proposed for the scenarios must be taken into account.

Keywords: tsunami, stochastic, Maule, Aida number, cascading.

The 2007 Aysen earthquake: a revised comprehensive inventory of coseismic landslides and new numerical simulations of the tsunami generation and propagation mechanisms

Alejandra Serey Amador¹⁻², Juan González³, Sergio Sepúlveda²⁻⁴

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile
(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
(3) CIGIDEN
(4) Simon Fraser University

Chile is one of the most seismically active countries on Earth. Strong earthquakes in Chile are often associated with cascading hazards, such as ground shaking, liquefaction, tsunamis, and coseismic landslides. In tectonically-active mountain areas, landslides represent the most frequent geological hazards and can cause significant economic losses during and after strong earthquakes. Additionally, around the world, coseismic landslides kill thousands of people with an increasing trend driven by human interventions, increasing global population, and natural processes.

The purpose of this presentation is to provide recommendations for the preparation of comprehensive coseismic landslides inventories, to obtain an updated comprehensive coseismic landslides inventory of the 2007 Mw 6.2 shallow crustal Aysén earthquake, and finally to obtain new numerical simulations of the tsunami generation and propagation mechanisms.

In total 781 landslides were re-mapped over a total area of c.1,350 km², based on unified coseismic landslides mapping criteria. The total landslide volume is c. 122.3 Mm³. 18% of coseismic landslides were concentrated within 0-1 km of seismic faults, and 55% of landslides within 0-5 km. Hence, the distance to the rupture plane of faults is a first-order factor in the distribution of landslides together with topographic amplification site effects.

A post-disaster analysis of the area affected has been conducted to collect new spatial data on tsunami inundation heights, nearshore, bathymetry, and velocities. In addition, numerical simulations of the tsunami generation and propagation mechanisms were carried out and validated with the inferred time series. Aguas Calientes landslide was identified along the southern shore of the Aysen fjord, Mentirosa Island Landslide complex, and Punta Cola avalanches in the northern fjord were simulated as generated by tsunami waves.

This new knowledge in the Aysen earthquake such as a case study has significant implications for cascading hazards and must be carefully considered in tectonic settings with a potential of both subduction interplate and shallow intraplate earthquakes.

Keywords: Aysen earthquake, landslides, tsunamis, patagonia, cascading hazard.

Financing: Programa de Cooperación Internacional RCUK-Conicyt Newton Fund, proyecto NE/ N000315/1 FONDECYT 1140317 CONICYT PFCHA/ DOCTORADO NACIONAL /2015 – 21150559FONDECYT/ANID 3230676.

Análisis del peligro de tsunami asociado a remociones en masa en los fiordos del Sur de Chile: Una aproximación mediante datos de acceso libre en la localidad de Hornopirén

Emiliano Tomás Vega Ruiz¹⁻², Edilia Jaque Castillo¹⁻², Alejandra Serey Amador³

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile.

(2) Grupo de Estudios Multiamenazas, Vulnerabilidades y Cambio Climático VRID 2021000383MUL, Universidad de Concepción

(3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

El evento multi-amenaza de Aysén del 2007 marcó un precedente en cuanto a los peligros geológicos en cascada, donde un terremoto cortical superficial de Mw 6,2 generado por la activación del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO) detonó distintos tipos de remociones en masa en el fiordo de Aysén. La avalancha de roca Punta Cola y el complejo de deslizamientos Isla Mentirosa en las costas norte del Fiordo provocaron olas de tsunami de amplitud de onda de más de 6 metros que costaron la vida de 10 personas.

El SFLO es un sistema de fallas transpresivas dextrales que se extiende desde los 38 a los 47° S, el cual acomoda parte de la deformación provocada por la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamérica. Diversos pueblos y ciudades se encuentran asentados a lo largo de los más de 1.000 km de longitud de este sistema, dentro de los cuales se encuentra la ciudad de Hornopirén (42°S), emplazada sobre zonas planas conformadas por sedimentos cuaternarios de origen fluvial, aluvial y glacial, donde además desembocan 3 ríos, formando amplias llanuras en la desembocadura que son utilizadas por pescadores, ya que se encuentran cubiertas temporalmente en períodos de mareas altas.

La geomorfología dominante en el área de estudio corresponde a abruptos y altos fiordos graníticos producto de la erosión glacial, donde Hornopirén se sitúa entre dos flancos de orientación NNE-SSO que conforman el canal Hornopirén, que a su vez están delimitados por el control estructural de la SFLO. Los registros sísmicos evidencian que esta zona está tectónicamente activa, potenciando la susceptibilidad de estos fiordos frente a eventos de remociones en masa generados por sismicidad cortical superficial.

La historia de Hornopirén no es ajena a fenómenos destructivos. En el año 1965, un tsunami provocado por una remoción en masa proveniente del Volcán Yate, condicionada por las debilidades estructurales de la SFLO y gatillada por la combinación del derretimiento glacial y lluvias, originó una ola de 25 metros de altura que ocasionó el fallecimiento de 28 personas y la destrucción total de los asentamientos junto al Lago Cabrera. Sin embargo, no existen registros históricos de grandes tsunamis generados por deslizamientos que hayan afectado al canal ni a la zona donde actualmente está situada la ciudad. No obstante, debido a las características geológicas, geomorfológicas y tectónicas similares que comparten el fiordo de Aysén con el fiordo Catemu, es que existe una alta probabilidad de que ocurra un evento en cascada similar al del 2007.

Estos procesos geológicos en cadena constituyen una amenaza de primer orden para Hornopirén, debido a que su orientación frontal al canal, cercanía con los fiordos y desembocaduras de ríos es propicia, no sólo para recibir el impacto directo de las olas, sino también para canalizarla al interior de la ciudad, como también impactar en las actividades de piscicultura situadas en el canal.

Basado en estudios previos de susceptibilidad del área a la generación de remociones en masa, modelos de elevación digitales y bases de datos sísmicas y geológicas, se seleccionan las zonas críticas a generar remociones en masa cosísmicas. Los parámetros según la normativa del SHOA a utilizar para la carta de inundación de Puerto Chacabuco son: el volumen del deslizamiento, posición del centro de masa, ancho de la masa, velocidad de ingreso al agua, recorrido y tiempo de movimiento. Posteriormente, mediante el software GEOWAVE, es posible evaluar el potencial tsunamigénico de los sectores considerados más críticos. Adicionalmente es posible determinar, de manera aproximada, las zonas de inundación ante distintos eventos tsunamigénicos y la combinación de éstos, determinando al menos tres sectores en el flanco Oeste del canal capaces de generar remociones en masa con capacidad para ingresar al agua y perturbarla, los cuales, dependiendo de su magnitud, pueden afectar principalmente a Punta del Cobre e incluso ser canalizados por los ríos.

Es importante considerar las limitaciones del estudio al momento de interpretar los resultados. La información batimétrica, parte esencial de la simulación, no posee la resolución óptima, y, debido a la inaccesibilidad a las zonas de generación de remociones, información valiosa sobre la geología y control estructural local podría estar siendo obviada. Aún así, estos parámetros estimados entregan una buena aproximación de un potencial evento en cascada, permitiendo la toma de decisiones para la planificación territorial, tomando siempre en cuenta los alcances mencionados.

Palabras Clave: Tsunamis, Remociones en Masa, Liquiñe-Ofqui, Inundación.

Agradecimientos: A la comunidad de Hornopirén por su valiosa disposición, ayuda y compartir de conocimientos. A Alejandra Serey por su colaboración y aporte de información valiosa.

Referencias:

- Náquira, M.V. (2009) Susceptibilidad de remociones en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X Región. Memoria de Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 212 p. Inédito.
- Opazo, E. (2020) Remociones en masa generadoras de Tsunamis: Determinación de parámetros para modelo de inundación en Puerto Chacabuco, Región de Aysén. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 7 p. Punta Arenas.
- Sepúlveda, S. A., & Serey, A. (2009). Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5 S). *Andean Geology*, 36(1), 131136.

- Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara,
- Serey, A. (2011) Análisis de las remociones en masa generadas por el terremoto del fiordo Aysén del 2007 (45,5°S). Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología, Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago. 137 p.
- Serey A. y otros (2023) Revised comprehensive inventory of landslides induced by the 2007 Aysén earthquake, Patagonia (In Prep).
- Soto, M. V., Sarricolea, P., Sepúlveda, S. A., Cabello, M., Ibarra, I., Molina, C., & Maerker, M. (2018) Geohazards in the fjords of northern Patagonia, Chile. *Sea Level Rise and Coastal Infrastructure*, 1, 38.
- Sotomayor, L. (2022) Neotectónica de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui Entre los 39° S y los 40.5 ° S: Implicancias para la Evaluación de la Amenaza Sísmica (Neotectonics of the Liquiñe-Ofqui Fault System, between 39 S and 40.5 S: Implications for Seismic Hazard (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción).
- Watt, S. F., Pyle, D. M., Naranjo, J. A., & Mather, T. A. (2009) Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of volcanology*, 71(5), 559-574.
- M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010) Landslides induced by the April 2007 Aysén fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, 7(4), 483-492.

Remociones en masa y degradación de la criósfera en el valle del río Colorado, cuenca alta del río La Laguna, región de Coquimbo

Alejandro Alfaro Soto¹⁻², Cristina Brantt¹, Sergio A. Sepúlveda²⁻³, Enrique Opazo¹, Jorge Parra¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, 8888 University Drive, Burnaby B.C., Canadá

En la cuenca alta del río La Laguna, cordillera del Valle del Elqui, se reconoce un dominio periglacial seco de alta montaña con cumbres que sobrepasan los 6.000 m s.n.m. y la presencia de geomorfologías glaciales y periglaciales que se manifiestan en distintas formas y sistemas (UGP UC, 2010). Se estima que la isoterma 0°C de temperatura media anual oscila entre los 4.000 y 4.100 m s.n.m. (Brenning, 2005), lo cual mantiene una relación directa con la presencia de glaciares rocosos activos (~4.000 m s.n.m.) e inactivos (~3.800 m s.n.m.), esta última cota indicaría en forma relativa el límite inferior de *permafrost* discontinuo de montaña (UGP UC, 2010; Brenning, 2005; Azócar & Brenning, 2010). Específicamente en el área de estudio, se han identificado glaciares rocosos activos en cotas desde los ~3.720 m s.n.m. y actividad criogénica incipiente a partir de los 3.650 m s.n.m. (Alfaro *et al.*, 2018).

En este contexto, los sistemas de circulación atmosférica, y la orografía, son claves para comprender las condiciones geocriológicas actuales. Dentro de los principales sistemas de circulación presentes, destacan el Monzón de Verano de Sudamérica, los vientos del oeste (*Westerlies*) y el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), que contribuyen al aporte de humedad desde el oeste, este y noreste del continente.

A fin de comprender el contexto glacial y climático reciente en el área de estudio, Robson *et al.* (2022) realiza un análisis de los cambios y balance de masa del sistema del Glaciar El Tapado, para el periodo 1956-2020, obteniendo un balance neto en torno a cero entre 1956 y 1978 y pérdida continua entre 1978 y 2020. Estos resultados se explicarían por el aumento en la temperatura del aire y disminución en la precipitación y humedad desde la década de 1980. Luego, las pérdidas de hielo observadas en este glaciar se ajustarían al promedio regional de los Andes semiáridos entre 2018 y 2000.

Estos cambios también son evidenciados en las variaciones de la línea de equilibrio glaciar (ELA). Según Paredes (2017) en El Tapado, la ELA se encuentra más baja durante el periodo húmedo 2013-2014 alcanzando los 4.600 m s.n.m. si se le compara con el periodo seco 2014-2015 donde la ELA se eleva hasta los 5.200 m s.n.m. Este último periodo a su vez se correlaciona con un evento inusual de ENSO entre 2014 y 2016.

En el presente trabajo se reconocen evidencias que podrían atribuirse a estos efectos climáticos, especialmente en el entorno directo del Glaciar El Tapado así como en diversas laderas y sectores elevados dentro de la cuenca, especialmente por sobre los 4.500 m s.n.m. Indicios de grietas de tracción, deslizamientos profundos y superficiales, flujos incipientes, entre otros, estarían reflejando la inestabilidad en la criósfera. Algunos de ellos estarían influenciados por precipitaciones a gran altura o incrementos de temperatura (Iribarren, 2010; Moreiras *et al.*, 2019; Carrasco, 2022).

Al analizar la distribución altitudinal de todos los movimientos en masa tipo deslizamientos y avalanchas de roca y detritos en el valle del río Colorado, se aprecia que las mayores cotas de éstos, determinado por la posición de los escarpes, se da en dos grupos parcialmente independientes. Por una parte, existe una distribución altitudinal de escarpes en torno a los 4.000-4.500 m s.n.m. que comprende los depósitos de mayores dimensiones relacionados con una *trimline* determinada por antiguos avances glaciales. Asimismo, aquel grupo de escarpes situados a mayor altura (4.500-4.800 m s.n.m.) tienen relación con el desarrollo de remociones en masa en quebradas tributarias o en reactivaciones de algunos de los grandes deslizamientos postglaciales.

Finalmente, las condiciones climáticas recientes darían cuenta de una relación, a lo menos espacial, entre mayores índices de favorabilidad de permafrost (Azócar, 2013), la distribución de las crioformas y varias de las remociones en masa identificadas con algún movimiento reciente. Luego, considerando las variaciones del clima en cuanto al aumento en la temperatura del aire y disminución en la precipitación y humedad desde la década de 1980, es muy probable que la inestabilidad y degradación de la criósfera, a nivel de laderas rocosas y detriticas, capa activa y permafrost, este controlada en gran parte por i) el desarrollo de niveles más extensos de permafrost discontinuo o esporádico, ii) profundización de la capa activa en el perfil de permafrost, iii) escasez de agua para recargar de los sistemas subsuperficiales de agua/hielo, iv) ascensión de la isoterma 0° tanto en periodos de precipitaciones, así como por v) eventos de olas de calor o variaciones abruptas de temperatura y vi) disminución de la precipitación sólida y aumento de la intensidad de la precipitación líquida a mayor altura.

Palabras Clave: remociones en masa, permafrost, degradación de criósfera.

Financiamiento: El presente trabajo ha sido financiado principalmente por la Subdirección Nacional de Geología, del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, como parte de los proyectos institucionales. Adicionalmente, se cuenta con el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de la Beca de Magister para Funcionarios Públicos.

Referencias:

- Alfaro, A., Brantt, C., Merino R.N. 2018. Interacción de procesos geológicos y desarrollo de geoformas como evidencias de un ambiente paraglaciar en la cordillera de Los Andes, valle del río Colorado, cuenca alta del Elqui. Actas XV Congreso Geológico chileno, pp. 663-665.
- Azócar, G. 2013. Modeling of Permafrost Distribution in the Semi-arid Chilean Andes. A thesis for the degree of Master of Science in Geography. 141 p

- Azócar, G. y Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1). pp. 42-53.
- Brenning, A. 2005. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modeling and field mapping. Tesis de doctorado, 153 p.
- Carrasco, J. 2022. Aplicación de interferometría radar de apertura sintética (INSAR) en tres eventos de remoción en masa en los andes chilenos, 155p
- Iribarren, A. 2010. Análisis del movimiento en masa de la Quebrada Blanca: implicancias en la dinámica geomorfológica y criogénica. Cuenca superior del río Elqui. *Investig. Geogr.* 42: 3-18.
- Moreiras, Stella Maris; Jeanneret, Pilar; Lauro, Carolina; Vergara Dal Pont, Iván Pablo; Correas González, Mariana et al. 2019. Deslizamientos asociados a la degradación del permafrost: evidencias geomorfológicas en el pasado y presente en los Andes Centrales (31°-34°S); Universidade do Estado do Rio de Janeiro; *Geo UERJ*; 35; 12-2019; 1-15.
- Paredes, C. 2017. Modelación de las respuestas hidrológicas en las cuencas glaciares Tapado (29°S) y Pirámide (33°S) en los Andes semiáridos de Chile. Tesis de magíster Universidad de Chile. 47p.
- Robson, B. A.; MacDonell, S.; Ayala, A.; Bolch, T.; Nielsen, P.; Vivero, S. 2022. Glacier and rock glacier changes since the 1950s in the La Laguna catchment, Chile. *The Cryosphere*, 16, 647–665.
- UGP UC. 2010. Dinámica de glaciares rocosos, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves, MO

Variaciones recientes en sistemas glaciofluviales y su relación con cambios en lagos glaciales en la zona sur y suroeste de Campo de Hielo Patagónico Norte

Marcelo Javier Santis Hernández¹, Gustavo Muñoz Cares¹, Rodrigo Fernández Vásquez¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN) corresponde a uno de los mayores cuerpos de hielo temperados en el hemisferio sur (~4.000 Km²), y es drenado por 30 glaciares mayores de salida con terminaciones en mar, tierra y lagos (Gourlet et al., 2016). En las últimas décadas, y debido al aumento global de temperaturas, se ha observado un retroceso generalizado de los frentes glaciales y por ende un aumento en la cantidad y áreas cubiertas por lagos glaciales (Loriaux & Casassa, 2013).

Un fenómeno asociado a lagos glaciales, son las inundaciones por drenaje repentino o GLOFs por su sigla en inglés (Glacial Lake Outburst Floods). Los GLOFs pueden generar caudales fluviales de un orden de magnitud mayor que los caudales anuales máximos (Cenderelli & Wohl, 2003) resultando en cambios geomórficos y sedimentarios notables en los sistemas glaciofluviales (SGF) que los drenan (Carrivick & Tweed, 2013;). Además, los GLOFs representan una amenaza creciente para la población local, tierras agrícolas y la infraestructura privada y pública (Iribarren et al., 2014). En Patagonia, se ha reportado un aumento de 66 Km² en el área cubiertas por lagos glaciales entre los años 1945 – 2011 (Loriaux & Casassa, 2013), mientras que estudios recientes han documentado una creciente frecuencia de GLOFs y sus peligros asociados (Wilson et al., 2018).

En CHPN, los estudios sobre GLOFs y sus efectos se han focalizado en las vertientes oriental y sur. Así, reportes recientes indican la ocurrencia de 16 eventos GLOF en el Lago Cachet II (Glaciar Colonia - cuenca este, 2008 – 2016) (Jacquet et al., 2017), 19 eventos GLOF para Laguna Los Témpanos, 7 eventos para Laguna El Bolsón y 5 eventos para la Laguna Sin Nombre (Glaciar Steffen - cuenca sur, 1974 – 2020) (Aniya et al., 2020). Respecto de la vertiente Suroeste y Sur de CHPN, o no existen reportes de eventos GLOFs, o estos son parciales, y no existe conocimiento de los efectos en la geomorfología o la dinámica sedimentaria en los SGF.

En esta contribución, se presentan los resultados preliminares de una evaluación de los cambios geomorfológicos (variaciones en cobertura de cuerpos de sedimento, agua (cuerpos activos e inactivos) y parches de vegetación) de los SGF y su asociación con cambios recientes de lagos glaciales de la zona oeste y sur de CHPN para el periodo 1985 – 2023. Para esto se realizó un exhaustivo procesamiento y análisis de imágenes obtenidas por sensores pasivos y activos, en específico se utilizaron imágenes multiespectrales de las misiones Landsat (5, 7, 8, 9), ASTER, Sentinel-2 e imágenes de radar Sentinel – 1. A partir de las cuales, se obtuvo variaciones anuales de cobertura de cuerpos de vegetación, agua y sedimentos, así como cambios areales de los lagos glaciales y un registro temporal de eventos GLOF.

Nuestros resultados muestran una tendencia al alza generalizada de ocurrencia de eventos GLOF con al menos 1 evento por año para cada uno de los lagos glaciales de las cuencas Benito, HPN1, Acodado, Steffen y HPN4 (2015-2023). En particular, el glaciar Steffen presenta un periodo sin GLOFs (2017-2021). Respecto a las variaciones geomorfológicas, se observa un aumento en la respuesta espectral relacionada a cuerpos de vegetación, la cual va cubriendo las zonas que se identifican como cuerpos de sedimento en los SGF de todas las cuencas en estudio (1987-2023). A excepción del SGF HPN4, el cual muestra un comportamiento fuera de esta tendencia con un aumento sostenido de la cobertura de sedimentos y una disminución marcada de zonas con vegetación. (2015-2023). Por lo cual, se discute la posible relación de la ubicación relativa de los lagos glaciales y la recurrencia de sus GLOFs, siendo más recurrentes en las cuencas Benito, HPN1 y Acodado (cuenca occidental) en comparación con las cuencas Steffen y HPN4 (cuenca sur).

A partir de nuestros resultados se concluye que la geomorfología proglaciar es altamente dinámica y fuertemente afectada al ajuste de parámetros glaciares y glaciofluviales a nuevas condiciones bajo el contexto de retroceso glaciar desde la Pequeña Edad del Hielo. Además, la expansión y nacimiento de nuevos lagos glaciares sugieren un control primario en la geomorfología de los SGF y en la tasa de aporte de sedimento hacia los SGF, y por ende también un control sobre los parámetros morfométricos (sinuosidad y trenzamiento) y dirección de drenaje de los ríos.

Palabras Clave: Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), Lagos glaciales, Peligro de inundaciones, Campo de Hielo Patagónico Norte.

Financiamiento: Proyecto de inserción Influencia de eventos de desagüe repentino de lagos glaciales (GLOF) en la geomorfología y dinámica sedimentaria del Río Huemules, Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), Región de Aysén (Director Rodrigo Fernández Vásquez - Universidad de Chile) Proyecto FONDEF IDeA I+D 2021 código ID21110094 "SAGAZ: Desarrollo de un prototipo de sistema de alerta para reducir el impacto de las inundaciones relacionadas con los glaciares" (Director Camilo Rada Giacaman - Universidad de Magallanes).

Referencias:

- Aniya, M., Dusallant Alejandro, O'kuinghtons, J., Barcaza, G., & Bravo, S. (2020). GLOFs of Laguna de los Témpanos, glacier-dammed side lake of Glaciar Steffen, Hielo Patagónico Norte, Chile, since 1974. *Bulletin of Glaciological Research*, 38(0), 13–24.
- Carrivick, J. L., & Tweed, F. S. (2013). Proglacial Lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78, 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>.
- Cenderelli, D. A., & Wohl, E. E. (2003). Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(4), 385–407. <https://doi.org/10.1002/esp.448>.
- Gourlet, P., Rignot, E., Rivera, A., & Casassa, G. (2016). Ice thickness of the northern half of the Patagonia Icefields of South America from high-resolution airborne gravity surveys. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 241–249. <https://doi.org/10.1002/2015GL066728>.
- Iribarren, P., Norton, K. P., & Mackintosh, A. (2014). Moraine-dammed lake failures in Patagonia and assessment of outburst susceptibility in the Baker Basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12), 3243–3259. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3243-2014>.
- Jacquet, J., McCoy, S. W., McGrath, D., Nimick, D. A., Fahey, M., O'kuinghtons, J., Friesen, B. A., & Leidich, J. (2017). Hydrologic and geomorphic changes resulting from episodic glacial lake outburst floods: Rio Colonia, Patagonia, Chile. *Geophysical Research Letters*, 44(2), 854–864. <https://doi.org/10.1002/2016GL071374>.
- Loriaux, T., & Casassa, G. (2013). Evolution of glacial lakes from the Northern Patagonia Icefield and terrestrial water storage in a sea-level rise context. *Global and Planetary Change*, 102, 33–40.
- Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Anaconda, P. I., Schaefer, M., & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>.

Evaluación de susceptibilidad de movimientos en masa de origen glaciar en la cuenca del río Volcán, Región Metropolitana

Felipe Ugalde Peralta¹, Sergio A. Sepúlveda Valenzuela²⁻³, Cedomir Marangunic Damianovic¹

(1) Geoestudios, Los Aromos 3371, San José de Maipo, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(3) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Burnaby, B.C., Canada

Los Andes centrales de Chile han estado sometidos a un severo estrés hidrológico debido a la ininterrumpida megasequía de los últimos 13 años. Al mismo tiempo, la región se caracteriza por ser la zona más poblada del país junto con albergar una gran variedad de glaciares, entre las que se cuentan las mayores masas de hielo fuera de la Patagonia. En este contexto, surge especial interés acerca de cómo la variabilidad del clima puede afectar la estabilidad de los glaciares de modo que estos sean más propensos a desencadenar fenómenos de movimiento en masa.

El presente trabajo presenta una evaluación de la susceptibilidad de movimientos en masa de origen glaciar en la cuenca del Río Volcán ($-32,82^{\circ}/-70,00^{\circ}$), ubicada a 40 km al este de la ciudad de Santiago. El área de estudio corresponde a una zona montañosa con un rango de elevación entre 3.380 a más de 6.000 m s.n.m. en el Complejo Volcánico San José. Su cercanía a la capital favorece las actividades al aire libre, el turismo y el desarrollo urbano e hidroeléctrico.

Se evaluó la susceptibilidad de 5 fenómenos diferentes basándose en un método de jerarquía analítica (AHP) mediante la definición de un índice de susceptibilidad (IS). Los múltiples procesos evaluados incluyen avalanchas de hielo, *surges*, deslizamientos catastróficos de glaciares, *GLOFs* y lahares primarios. La metodología desarrollada para el análisis considera la definición, ponderación y desglose de múltiples factores condicionantes de origen atmosférico, criosférico y geológico. La escala de trabajo para su aplicación varía entre 1:10.000 a 1:25.000. Por otro lado, el estudio contempla una alternativa simplificada del análisis de susceptibilidad, desarrollado para el escenario en que no se disponga de información de detalle de los glaciares del área de estudio. El método simplificado se emplea, además, como un análisis de sensibilidad de los factores condicionantes considerados por fenómeno de movimiento en masa.

A partir de una revisión y actualización del Inventario Público de Glaciares DGA 2022, se contabilizan 195 glaciares en la zona, de los cuales 47 son glaciaretos, 15 glaciares de montaña, 8 glaciares de valle y 125 glaciares rocosos. De estos, 70 glaciares "blancos", o no rocosos, se someten a la evaluación de susceptibilidad de movimientos en masa. Los resultados muestran que, dentro de la cuenca del Río Volcán, 4 glaciares son altamente susceptibles a las avalanchas de hielo, 1 ante *surges*, 2 a deslizamientos catastróficos y 2 ante procesos *GLOFs*, mientras que 19 glaciares, principalmente glaciaretos (68%), son altamente susceptibles a los lahares primarios. Sólo el glaciar Loma Larga, de 7 km de longitud, es altamente susceptible ante 3 de los 5 procesos evaluados, excluyendo los lahares y avalanchas de hielo.

Se concluye que el método propuesto puede utilizarse en otras regiones una vez aplicados los ajustes relacionados a la escala de trabajo y al peso de los factores condicionantes a considerar.

Palabras Clave: Susceptibilidad, GLOF, Lahar, Glaciar, Avalancha.

Financiamiento: Este trabajo fue realizado con el apoyo de Geoestudios Asesores S.A.

Avalanchas de hielo en el Salto del Olivares, Región Metropolitana

Felipe Ugalde Peralta¹, Javiera Carrasco Gálvez¹, Cedomir Marangunic Damianovic¹

(1) Geoestudios, Los Aromos 3371, San José de Maipo, Chile

En el contexto de la habilitación del Parque Nacional Glaciares de Santiago, comprender qué glaciares pueden suponer una amenaza a la población es clave para concientizar acerca de los peligros criosféricos en el sector.

La presente contribución da cuenta de una serie de eventos de remoción en masa originados en el glaciar de montaña código IPG2022_v1 CL105706075 (-33,165°/-70,085°), de acuerdo al Inventario Público de Glaciares 2022 de la DGA. Estos procesos se desencadenaron en la forma de al menos dos avalanchas de hielo, ambas ocurridas en el año 1992. La primera remoción se originó en el mes de marzo de 1992, mientras que la segunda, de mayor alcance, ocurrió en diciembre del mismo año. El hallazgo se llevó a cabo mediante el empleo de imágenes satelitales Landsat 5 TM.

El fenómeno ocurrió a los pies del cerro Risopatrón en el valle del estero El Plomo, afluente del río Olivares bajo el salto homónimo. El glaciar que dio origen a las avalanchas de hielo se caracteriza por un abrupto frente colgante seguido de una porción inferior que rellena el segmento de menor cota del valle (identificada con el código IPG2022_v1 CL105706110). Este glaciar se encontraba separado del cuerpo superior al momento en que ocurrieron las avalanchas de hielo, configuración que ya se apreciaba en el año 1955 a partir de fotografías aéreas Hycon. Hoy ambos glaciares, superior e inferior, mantienen su categoría de glaciares de montaña de acuerdo al IPG2022_v1, con una superficie de 2,3 y 0,3 km², respectivamente.

El depósito asociado al primer pulso de la avalancha de hielo alcanzó una extensión lineal cercana a 600 m en el valle principal, ocupando un área de 15,5 ha. Por otro lado, el segundo evento dio origen a un depósito de más de 1.000 m de extensión lineal, con una superficie de 33,7 ha. Su morfología aún es posible de apreciar en terreno en la forma de hummocks. El desnivel recorrido por la remoción fluctúa entre 1.300 y 1.600 m. Si bien a la fecha no se ha constatado otro evento de similar magnitud al descrito, es posible evidenciar la presencia de sucesivos depósitos de avalanchas provenientes del glaciar superior que continúan alimentando al glaciar inferior. Lo anterior permite suponer una recurrencia de las avalanchas de hielo originadas en el glaciar CL105706075, aunque de menor magnitud que aquellas del año 1992.

Un proceso recurrente de esta naturaleza constituye una amenaza latente en la cabecera del río Olivares. En consecuencia, es necesario caracterizar en detalle la avalancha de hielo y evaluar el peligro de un potencial pulso similar a aquellos del año 1992. Lo anterior dado el inminente aumento de la afluencia de público producto de la creación del Parque Nacional en la Región.

Palabras Clave: Avalancha, Glaciar, Olivares, Peligro.

Revisión sistemática del rol de las fallas geológicas en minería subterránea

Lucy Bravo Rojas¹⁻², Luis Felipe Orellana¹⁻², Tomás Roquer¹⁻², Javiera Fieldhouse García¹⁻²

(1) Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

La creciente demanda de metales provocada por el crecimiento económico mundial y el agotamiento de los recursos de la superficie ha obligado a que las minas sean subterráneas y las que actualmente son de este tipo cada vez sean más profundas. Una consecuencia directa de esta evolución es el aumento de los problemas mineros relacionados con los altos esfuerzos en profundidad, lo cual conlleva que inestabilidades presentes en la mina se vuelvan cada vez más severos. Las fallas geológicas son discontinuidades mecánicas de la litósfera que alteran el campo de esfuerzo y deformación en la roca circundante, y que pueden afectar directamente la estabilidad del macizo rocoso, lo que es crucial para garantizar la seguridad y productividad de las minas subterráneas.

Este trabajo presenta una revisión exhaustiva del rol de los sistemas de fallas en minería subterránea, con el objetivo de analizar factores críticos de estas estructuras respecto de la operación minera. Los resultados preliminares de esta revisión sistemática muestran que gran parte de las investigaciones se basan principalmente en la minería del carbón, y secundariamente en la minería de metales.

En la mayoría de los casos la fallas en minería subterránea son causada por alguna inestabilidad en el macizo rocoso, que incluyen principalmente estallidos de rocas, percolación de agua, colapso de galerías y sobre-excavación de piques. Estas inestabilidades se ven influenciadas por diversas características de las fallas geológicas, como su localización, tamaño, desplazamiento, orientación, fracturas asociadas, conectividad, propiedades friccionales, elásticas, e hidráulicas, como también sus propias características de microestructura, geoquímica, mineralogía. Dichas características pueden alterar la operación minera, es decir, afectar la estabilidad del macizo rocoso y plantear riesgos de seguridad para el personal de la mina. Por otra parte, las operaciones pueden potencialmente afectar la activación de fallas de varias maneras, producidos por cambios en la distribución de esfuerzos, por el movimiento de fallas preexistentes, también se puede llegar a aumentar el esfuerzo sobre la falla, generando que se supere la resistencia friccional y posteriormente movimiento en la falla pudiendo incluso llegar a ocurrir estallidos de rocas o eventos sísmicos.

Finalmente, la investigación futura debe centrarse en mejorar las técnicas de detección y caracterización de fallas, mejorar el modelado predictivo del comportamiento de fallas y desarrollar enfoques innovadores de mitigación adaptados a diferentes tipos de fallas y condiciones mineras.

En conclusión, esta revisión subraya la importancia de comprender las fallas en la minería subterránea y su relación con la operación minera. Al obtener información sobre las características de las fallas y su impacto, los profesionales de la minería pueden optimizar la planificación de la mina, y mejorar los protocolos de seguridad y eficiencia operativa de la mina.

Palabras Clave: Operación Minera, Estabilización Macizo Rocos, Permeabilidad, Mineralización, Sistema de fallas.

Factores condicionantes y mecanismos de ocurrencia de remociones en masa co-sísmicas en los Andes del Sur: Caso de estudio valle de Linoico, región de los Ríos, Chile (39° 35" S)

Álvaro Bravo-Alarcón¹, Ivo Fustos², Daniel Vásquez-Antipán², Alvar Pastor¹, Pablo Moreno³

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 2950, Temuco, Chile

(2) Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Francisco Salazar 1145, Temuco, Chile

(3) Universidad Wisconsin-Madison, Departamento de Geociencias, Madison, WI 53706-1380, Estados Unidos

En mayo del año 1960 se registró en Chile el terremoto de mayor magnitud en la historia, generando en el sector cordillerano Remociones en Masa (REM) cosísmicas en las cercanías del lago Calafquén y Pellaifa (39°S-40°S). Se llevó a cabo un estudio en el valle de Linoico ubicado al NW del lago Pellaifa (39° 35" S aproximadamente) para comprender los factores involucrados y los mecanismos de generación de estas REM co-sísmicas, contemplando los suelos y rocas involucrados, junto a la geomorfología que presenta el valle. Se realizó un enfoque multiparamétrico considerando análisis de campo, ensayos in situ y de laboratorio para identificar las características geológicas y geotécnicas de los materiales y posteriormente integrar todo mediante la modelación numérica en el software MIDAS GTS-NX.

Las condiciones geológicas indican que las REM se concentran en laderas con pendientes superiores a los 35° compuestas por un basamento ígneo extrusivo pertenecientes al Complejo Volcánico Sierra Quinchilca (CVSQ) y una cubierta de tefra asociada a la ignimbrita Neltume del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, los cuales se encuentran afectados por la erosión y meteorización generada por el último gran periodo de glaciación ocurrido durante el Pleistoceno. Los basaltos presentan una gran cantidad de fracturas asociadas a discontinuidades estructurales que atraviesan gran parte del valle, generando una menor resistencia a los esfuerzos normales y tangenciales actuantes. La cubierta de tefra posee las características de un material no friccionante, lo que implica que posee una alta inestabilidad mecánica ante cargas sísmicas debido a la ausencia de cohesión entre sus partículas. Además, la aplicación de la técnica de Nakamura sugiere que la tefra posee una gran capacidad de amplificación sísmica debido a los contrastes de impedancia entre los medios de propagación. De la misma forma, las simulaciones numéricas realizadas considerando un terremoto de subducción y otro cortical, muestran patrones de deformación heterogéneos en las laderas, con zonas de mayor aceleración en las crestas y de menor aceleración en la base del valle, sugiriendo que también hay un efecto de amplificación asociado a la topografía. Los resultados obtenidos en la simulación, fueron comparados con la distribución de las coronas de las REM ocurridas durante el terremoto de Valdivia de 1960, indicando una alta correlación espacial con las zonas de mayor aceleración.

Concluimos que la compleja topografía del valle de Linoico, la presencia de discontinuidades estructurales, junto con la cubierta de material piroclástico tanto en las crestas como en el interior del valle, corresponden a algunos de los factores responsables de la amplificación sísmica local y de los mecanismos de ocurrencia de REM durante un terremoto. Por lo tanto, es suma importancia considerar estos factores a la hora de identificar zonas propensas a la ocurrencia de REM en la Zona Volcánica Sur de los Andes, para así mejorar la evaluación de los peligros geológicos y tener una mayor cantidad de herramientas que sean útiles en la mitigación de los impactos generados sobre la población en general y los ecosistemas.

Palabras Clave: Terremotos, Remoción en Masa, Material piroclástico, Discontinuidades estructurales.

Financiamiento: La tesis de pregrado de Álvaro Bravo fue financiada en su totalidad por el Proyecto FONDECYT 11180500 del Dr. Ivo Fustos. El financiamiento incluyó las campañas de terreno y los análisis de laboratorio necesarios para el desarrollo de la investigación.

Agradecimientos: Agradecemos a Manuel Manosalva, a Daniel Vásquez, Vicente Cisternas por el terreno, a Wilson Benavides, Jaime Cárdenas y Gonzalo Maragaño en geotecnia, y a Sergio Ruiz por datos sísmicos.

A study on the frictional properties of rock and their relation to fault-slip rockbursts: preliminary results

Javiera Fieldhouse García¹⁻², Luis Felipe Orellana Espinoza¹⁻², Tomás Roquer Rodríguez¹⁻²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

Mining is reaching greater depths worldwide, leading to the emergence of extreme conditions in the vicinity of underground excavations. These conditions encompass high in-situ and induced stress, natural seismicity, temperature escalation, and other related factors. Moreover, the intersection of tectonic fault systems with ore bodies creates a predisposition for active and potentially unstable sliding conditions. The activation of fault systems can precipitate the collapse of underground infrastructure if accompanied by catastrophic rockbursts.

To investigate fault-slip rockbursts, we conducted tests on pulverized samples of CMET (El Teniente Mafic Complex) rock under stress levels similar to those encountered in deep mining. These tests utilized a double direct shear biaxial configuration. Ensuring the safety of an underground mine requires that the host rocks be seismically stable. However, in the El Teniente mafic complex, fault systems with identified tectonics pose a risk to the stability of the mine works. We studied the frictional properties of CMET by conducting velocity step tests (1, 3, 10, 30, 100, and 300 $\mu\text{m/s}$), involving sudden increases in velocity, and slide-hold-slide tests with waiting sequences of 1-3-10-30-100-300-1000 s on simulated fault gouge at various normal stresses (up to 60 MPa), which replicate conditions of interest for underground mining. Each experiment followed a typical computer-controlled displacement history.

The shearing process commenced with an initial stage at a constant displacement rate of 10 $\mu\text{m/s}$ for approximately 5.5 mm. During this phase, the sample deformed quasi-elastically until reaching a peak friction value, followed by an evolution towards a steady state sliding friction.

Preliminary results indicate a velocity-dependent friction behavior, exhibiting either a velocity strengthening or weakening regime, contingent upon the normal stress values and humidity conditions (wet or dry). In wet conditions, lower friction parameters were observed, suggesting a diminished strengthening effect.

Keywords: fault-slip, CMET, Mining, frictional properties, Teniente.

Financing: Department of Mining Engineering, FCFM Universidad de Chile Advanced Mining Technology Center, FCFM Universidad de Chile.

Las Leñas International Tunnel: Geomechanical challenges in large-scale tunneling projects across The Andes

Alejandro Flores Bertoglio¹, Rodrigo Orellana¹, Juan Ulloa¹, Giorgio Höfer-Öllinger²

(1) Geoconsult Latinoamérica, Andrés Bello 2777 Of. 502, Santiago, Chile

(2) Geoconsult ZT GmbH, Salzburg, Austria

Developing large-scale tunneling Projects in orogenic regions imply enormous technical challenges. Las Leñas International Tunnel Project through the Andes Main Cordillera of Chile and Argentina has been a long-awaited infrastructure project, whose geological and topographic settings suggest several complex singularities to be considered, analyzed, and assessed during its development. Throughout the course of this feasibility study, the complex geological subsurface interpretation offered a broad spectrum of technical demands to be fulfilled.

The complex topographic and overburden conditions offer a first order challenge for the process of defining the tunnel alignment, while the tectonic and stratigraphic evolution of the area, including wide-scale basin inversion through reverse faulting, has enabled the uplift and exposure of ancient Mesozoic and Cenozoic geological units. The presence of certain lithologies, such as expansive clays or marine soluble evaporitic sequences, imply that special rock behaviour had to be assessed. Along with that, regional stress field conditions had to be studied in order to both optimize the tunnel alignment, and to obtain an idea of failure types of rock mass can suffer during the construction of the tunnel.

Through extensive geological mapping campaigns, geotechnical and geomechanical characterization, mapping and conceptual hydrogeological modelling, subsurface 3D modelling interpretation, and numerical analysis, several possible rock mass behavior types were analysed. A wide range of modern techniques were used to assess those mentioned tasks, which enable an extensive comprehension of the geological and geotechnical conditions of the area.

The purpose of this contribution is to enrich the knowledge about geological and geomechanical challenges faced in large tunnelling infrastructure projects in high mountain environments, such as the Andes Cordillera, and what specific lessons may arise from them for similar future projects that may arise in the region.

Keywords: overburden, rock burst, brittle/plastic behavior, stress, Andes.

Monitoreo de humedad del suelo mediante sensores Low-cost

Ivo Janos Fustos-Toribio¹, Mauricio Galleguillos², Gonzalo Maragaño Carmona¹, Carlos Faundez³, Javiera Carrasco¹, Oscar Seguel⁴

(1) Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar 1145, Temuco, Chile

(2) Universidad Adolfo Ibáñez, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Diagonal las Torres 2640, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería y suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Av. Santa Rosa 11315, Santiago, Chile

Comprender la circulación del agua en diferentes proyectos de ingeniería geológica es crucial para tener diseños de ingeniería con altos estándares de seguridad. Los métodos actuales requieren monitoreo recurrente in-situ o bien, mediante la realización de calicatas con instalación de agujas de humedad. Las herramientas de monitoreo actual tienden a ser eficientes y robustas, pero introducen una alteración al medio. Para abordar este problema, se desarrolló un equipo de resistividad eléctrica mediante sondaje eléctrico vertical a nivel LOW-COST (VES-UFRO). VES-UFRO permitió caracterizar las propiedades del subsuelo, obteniendo información sobre la distribución y la variabilidad de la resistividad eléctrica a diferentes profundidades.

El proceso de desarrollo de este equipo implicó la construcción de un sistema de relay comandados por multiplexores tipo I2C, los cuales fueron centralizados mediante un sistema de procesamiento central basado en raspberry. El sistema está equipado con una serie de electrodos que se utilizan para inyectar corriente eléctrica en el subsuelo y medir el potencial eléctrico resultante. A partir de estas mediciones, se pueden calcular los valores de resistividad eléctrica en diferentes profundidades. Estos valores fueron invertidos y comparados con sondas existentes a una distancia de 40 cm, con el fin de tener valores de humedad a diferentes profundidades. Se entrenó a 6 diferentes profundidades entre los meses de octubre de 2022 a Mayo de 2023, lo cual permitió tener un modelo de humedad basado en VES con un error menor a $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

El desarrollo de este equipo tiene profundas implicaciones en el avance del monitoreo de humedad en ambientes que no se pueden perturbar, tales como remociones en masa activas, taludes o monitoreo de transferencia hídrica en sistemas naturales. El uso de este equipo permitirá a futuro explorar el rol de la transferencia de agua en el subsuelo, pudiendo enfocarse en acuíferos, cuerpos de minerales o áreas con alta concentración de arcillas. Resultados preliminares permiten sustentar que el sistema proporciona información crítica para la evaluación de la estabilidad de laderas y la planificación de proyectos de ingeniería.

Palabras Clave: Geophysical instrumentation, Desarrollo low-cost, Humedad del suelo.

Financiamiento: FONDECYT 1210932/FONDECYT 1230792.

Evaluación de susceptibilidad ante tsunamis en la comuna de Puerto Saavedra, Chile (38°S y 73°E)

Tiare Guerra Catalán¹, Ivo Fustos¹, Mauricio Hermosilla¹, Álvaro Bravo², Gonzalo Maragaño¹

(1) Universidad de La frontera, departamento Ingeniería de Obras Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar 1145, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Juan Pablo Segundo Avenida Rudecindo Ortega 02950, Temuco, Chile

El contexto tectónico bajo el que se encuentra Chile presenta una alta recurrencia de eventos sísmicos al estar situado en un borde activo, estos fenómenos por sí solos son una amenaza inminente, y además son capaces de provocar otras amenazas que impactan al relieve/ topografía y comunidades locales. Dentro de las últimas destacan los tsunamis, los que se categorizan como un riesgo permanente para todas las comunidades costeras del país según registros históricos. Eventos pasados han causado pérdidas estructurales, económicas y humanas a lo largo del país. En la localidad de Saavedra estos eventos generaron un gran impacto por efecto del terremoto de Valdivia de 1960 (9,5 Mw). El tsunami arrasó completamente el puerto, la zona urbana y gran parte de los suelos aptos para la agricultura en el sector del lago Budi, los son conservados por la comunidad "lafkenche", que en mapudungun se refiere a "gente del mar". El puerto de la localidad previo al evento funcionó como puerto activo que se utilizaba como vía de comercio. El impacto del tsunami evidenció su rol, transformando el relieve, poniendo fin al tránsito de embarcaciones y destruyendo la economía de Puerto Saavedra. Este caso evidencia la necesidad de poseer mapas ante este tipo de amenazas de forma colaborativa entre la academia, el municipio y residentes de la comuna. Se desarrolló un modelo de susceptibilidad mediante una recopilación de datos y modelos numéricos, con el fin de entregar información de zonas inundables a los tomadores de decisiones. Esto se realizó en el marco de la entrada en vigencia de la ley 21.364, la que obliga a los municipios a poseer modelos de susceptibilidad y riesgo ante las amenazas naturales de mayor relevancia que afecten a su territorio.

La investigación se basó en dos etapas, en la primera se elaboró una base de datos con las amenazas de mayor relevancia en la comuna, mediante levantamiento de datos y reuniones con las entidades municipales correspondientes. En la segunda etapa, se ejecutó el modelamiento numérico mediante el software GeoClaw considerando información bibliográfica y las imágenes de aerofotogrametría obtenida por vuelo de drone.

Se concluye que dependiendo de la orientación y ángulo de la ruptura se incrementa el riesgo a una inundación por tsunami a la localidad. Mediante el modelamiento numérico se obtuvo que las zonas de mayor inundación se ubican en el sector norte de la comuna afectando en gran porcentaje a la zona urbana y, además a sectores aledaños al río imperial debido a su desbordamiento por el ingreso del mar. Sin embargo, en el sector sur afecta principalmente a centros turísticos y comunidades mapuches costeras "lafkenche" y también los residentes asentados en las orillas del lago Budi, el cual incrementa su nivel en algunos metros. Además, se identificó que la barra generada posterior al mega terremoto de 1960 cumple un rol fundamental en la protección del sector urbano, debido a la capacidad que ésta tiene de captar el frente ondas disipando la energía y de esta manera, mitigando el daño.

Palabras Clave: amenazas naturales, Tsunami, Mapa de susceptibilidad, Aerofotogrametría.

Financiamiento: La investigación fue financiada en su totalidad por el proyecto "Prototipos de Innovación Social para los Territorios de Nahuelbuta y Costa Araucanía" organizado por el proyecto de Redes, Gobernanza y Políticas Públicas de la universidad de La frontera otorgado al Dr. Ivo Fustos. Esto incluyó visitas a terreno, actividades para el desarrollo de nuestra investigación e impresión de mapas.

Agradecimientos: Agradecemos a Patricio Paillalef, encargado del departamento de la gestión del riesgo de desastres de la municipalidad de Puerto Saavedra, al IDER por la gestión del proyecto.

Influencia estructural en el punto de entrada de dilución mediante el uso de modelos análogos

Ignacio Durán¹, Pamela Paz Jara¹

(1) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería

Como consecuencia de la problemática asociada a la dilución en los proyectos mineros que emplean métodos de explotación por hundimiento gravitacional, surge la necesidad de investigar en detalle una de las variables fundamentales para el diseño de proyectos mineros de Block Caving o de Panel Caving. En este contexto, se plantea la idea de realizar un estudio sobre el impacto que puede generar la presencia de una estructura geológica en el Punto de Entrada de Dilución (PED), para comprender y evaluar su influencia, proporcionando así información valiosa para el diseño y la optimización de dichos proyectos. Con el fin de abordar esta problemática, se desarrolló y construyó un dispositivo de modelación capaz de crear un entorno compresivo para generar fallas inversas en un material particulado. Se establecieron seis escenarios distintos que representan diferentes configuraciones para analizar las variables clave: la presencia o ausencia de una estructura geológica y la granulometría utilizada en cada caso. Debido a la naturaleza simplificada del modelo análogo utilizado, no es posible obtener un resultado cuantitativo directo que represente el Punto de Entrada de Dilución (PED) en términos porcentuales del volumen de material extraído. Por lo tanto, se propuso definir y analizar la variación de este punto mediante un enfoque empírico denominado "PED empírico", que se obtiene a través de la medición del volumen de material extraído en cada escenario.

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar el impacto de las estructuras geológicas en el caso de estudio. Se realizaron diferentes escenarios que involucraron variaciones en la granulometría de la arena a extraer, y se obtuvieron los siguientes resultados: en el caso de arenas finas, tanto con estructura como sin ella, se obtuvo un valor de Punto de Entrada de Dilución (PED) de 0,9 litros. En los escenarios donde solo el material fino era considerado como estéril, se obtuvo un PED de 1,6 litros. Por último, en los dos escenarios restantes, se obtuvo un PED de 1,0 litros. Una vez obtenidos los resultados del Punto de Entrada de Dilución (PED) para cada caso planteado, se procedió a analizar los datos en función de las variables. Específicamente, se compararon los resultados de los escenarios con la misma granulometría, variando únicamente la presencia o ausencia de estructuras geológicas. Como resultado, se formaron tres grupos de estudio. A través del análisis empírico, se determinó que la presencia de una estructura geológica del tipo falla inversa no genera un impacto significativo en el PED en esta configuración en particular; pero se recomienda revisar posibles mejoras al *set-up* previo a presentar resultados concluyentes. Por otra parte, se observó que el PED obtenido es mayor cuando la granulometría del material definido como mineral es mayor. Finalmente, se puede concluir que, el modelo análogo cumple la función de generar ambientes compresivos y formar fallas inversas, además de que el trabajo experimental pudo identificar el impacto de las variables analizadas ante el PED, por lo que se logró reducir una incertidumbre propuesta en este trabajo, obteniendo una mayor certeza acerca del punto de entrada de la dilución propuesto por Laubscher. Si bien el aparato de modelación análoga fue diseñado específicamente para generar ambientes compresivos y simular la extracción en métodos de explotación subterránea mediante hundimiento gravitacional masivo, así como analizar el Punto de Entrada de Dilución (PED), no se limita únicamente a estos aspectos, ya que ha sido diseñado para ser versátil y manipulable, lo que permite realizar una amplia gama de ajustes y modificaciones para analizar diferentes variables planteadas. Entre otros, se pueden modificar: el sentido del esfuerzo principal y generar un ambiente extensional, los esfuerzos "litostáticos" a escala (modificando los 13 litros de arena utilizados), ajustar las alturas de interacción, variar las relaciones entre la cantidad de estéril y mineral, utilizar diferentes tipos de materiales, entre otras posibilidades.

El dispositivo de modelación análoga desarrollado estará disponible en las instalaciones de la Universidad de Santiago de Chile (DIMIN-USACH) para su uso en futuras investigaciones.

Palabras Clave: Modelo análogo, dilución, estructuras, ambiente compresivo, Punto de Entrada de Dilución (PED).

Referencias:

- Acevedo, J.; Bustos, F.; Conejeros, N.; Jara, P. (2018). Versatilidad de una mesa para modelos análogos de deformación a escala geológica. Revista Geoingeniería. Revista de Ciencias de la Tierra. Vol.1: Earth Sciences and its impact on Society. Universidad de Santiago de Chile.
- Brown. (2004). Block Caving Geomechanics. Queensland: The University of Queensland.
- Iribarra, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de caving (Trabajo de Titulación). Santiago: Universidad de Chile.
- Laubscher. (1994). Cave mining - the state of the art. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy
- Paredes, P. (2012). Mecanismos de entrada de dilución en minas de Block/Pannel caving (Trabajo de Titulación). Universidad de Chile.
- Pierce, M. E. (2010). A model for gravity flow of fragmented rock in Block Caving mines. University of Queensland WH Bryan Mining & Geology Research Centre.

Evaluación de la estabilidad mecánica de laderas en edificios volcánicos utilizando el método de reducción de resistencia mediante modelo con elementos finitos: caso del volcán Villarrica

Gonzalo Maragaño Carmona¹⁻², Ivo Fustos Toribio¹

(1) Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #1145, Temuco, Chile

(2) Universidad de La Frontera, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar #1145, Temuco, Chile

El volcán Villarrica, uno de los estratovolcanes más activos de los Andes del Sur, se encuentra ubicado entre las coordenadas 39°25' S y 71°56' O, con una altitud de 2.487 m s.n.m. La interacción de múltiples procesos volcánicos y climáticos a lo largo de la historia geológica ha dado forma a la compleja geometría actual del volcán Villarrica. Sus laderas presentan una geomorfología compleja e irregular, incluyendo glaciares, y en sus cercanías se encuentran asentamientos urbanos expuestos a diversos procesos eruptivos, como flujos laháricos y colapsos de laderas. La ocurrencia frecuente de ciclos eruptivos ha tenido un impacto crítico en los habitantes y la infraestructura civil de esta región montañosa, lo que demuestra su alta susceptibilidad a ser afectada. Por lo tanto, es fundamental comprender en profundidad las condiciones críticas en las que podría producirse un colapso volcánico, con el fin de desarrollar herramientas útiles para la mitigación y la gestión del riesgo asociado a este tipo de amenazas naturales.

En este estudio, se realizó un análisis de estabilidad mecánica utilizando el método de reducción de resistencia (strength reduction method) mediante modelación con elementos finitos utilizando el software MIDAS GTS NX. La parametrización de entrada fue definida a partir de instrumentación geotécnica y trabajo de campo. Se determinaron las zonas propensas a colapsos volcánicos mediante la variación del Factor de Seguridad (FoS). Se identificaron como críticas aquellas zonas cercanas a las ciudades de Villarrica y Pucón, donde se encontraron al menos 4 laderas con condiciones de inestabilidad, presentando valores de factor de seguridad inferiores a uno. Las variaciones negativas más significativas se observaron en los sectores proximales y medios de las laderas del volcán Villarrica.

Nuestros resultados resaltan la necesidad de seguir desarrollando medidas de mitigación y acciones preventivas para reducir los daños asociados con este tipo de peligro geológico. Estos hallazgos proporcionan un nuevo enfoque para determinar las zonas propensas a desarrollar procesos gravitacionales en el volcán Villarrica, y contribuyen al avance en la gestión del riesgo y la toma de decisiones informadas en esta área.

Palabras Clave: Landslide, volcán Villarrica, Midas GTS NX, Factor de Seguridad, Andes del Sur.

Financiamiento: Proyecto Fondecyt 1230792 y Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera, Temuco.

Agradecimientos: Agradecemos al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de La Frontera, por los espacios de trabajo facilitados y por cada debate científico, que permitieron el desarrollo de este trabajo.

Referencias:

- Díaz Castellón, R., Carrasco Núñez, G., & Álvarez-Manilla Aceves, A. (2008). Mechanical instability quantification of slopes at Cofre de Perote volcano, eastern Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(2), 187-201.
- Manzoni, P. (2012). Slope stability analysis of the Pacaya Volcano, Guatemala, using limit equilibrium and finite element method. Michigan Technological University.
- Pilecka, E., & Moskal, M. (2018). Numerical analysis of landslide next regional route No. 975 in Borowa before and after securing it. *AUTOBUSY-Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 19(6), 202-206.
- Russo, G., & Giberti, G. (2000). Mechanical stability of Mt. Vesuvius volcano: effects of asymmetries on the stress field. *Surveys in geophysics*, 21(4), 407.

La relevancia del análisis del peligro por caída de rocas en zonas de alta exposición: El caso del Rano Raraku, la cantera de los Moai en Rapa Nui

Manuel Romero Elgueta¹, Laura Becerril Carretero²

(1) Universidad de O'Higgins, Ingeniería Geológica, Escuela de Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Ingeniería Geológica, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

El análisis de los peligros geológicos asociados a la estabilidad de taludes en zonas de gran exposición, tales como caminos turísticos o zonas con alto tránsito, cobra gran relevancia como insumo en los planes para la reducción del riesgo de desastres, concretamente asociados a las remociones en masa, que deben garantizar la seguridad de los transeúntes. En este sentido, como primer paso en el análisis del peligro por caída de rocas, se debe realizar un estudio de la calidad del macizo rocoso, que puede ir acompañado a posteriori por análisis de estabilidad y de susceptibilidad a estas caídas. En lugares altamente turísticos como Rapa Nui (Isla de Pascua) este tipo de análisis cobra aún mayor relevancia.

El volcán Rano Raraku es un cono de tobas formado en una erupción hidromagmática que presenta un escarpe de ~160 m asociado a un paleoacantilado y que albergaba en su cráter un humedal actualmente seco. Éste se encuentra dentro del Parque Nacional de Rapa Nui, el cual está a cargo de la Comunidad Mau Henua, y fue declarado en 1995 como Patrimonio Mundial de la UNESCO. Este sitio posee una gran importancia cultural, al tratarse de la cantera ancestral que fue utilizada para la elaboración de los Moai, siendo uno de los puntos más visitados por los turistas y la comunidad Rapa Nui. Para la visita a los Moai existe un camino que bordea paralelamente la base del cono hasta llegar a la zona del paleoacantilado. Para la comunidad Rapa Nui el turismo es una de sus fuentes principales de ingreso y empleo, con más de 150.000 visitantes al año (Salina, 2022), por lo que resulta crucial la seguridad de las actividades que se desarrollan en los sectores visitados y preservar el entorno geológico generado por el impacto de dichas actividades.

Con motivo de brindar apoyo a la comunidad Rapa Nui tras del incendio que afectó al humedal Rano Raraku el 4 de octubre del 2022, surgió el proyecto Voluntariado Científico 2023. Esta Iniciativa se desarrolló durante los meses de enero a marzo del 2023 en colaboración con CONAF Rapa Nui en conjunto con estudiantes de tres universidades: Universidad de Chile, Universidad Andrés Bello (Viña del Mar) y Universidad de O'Higgins. Uno de los objetivos principales del voluntariado se centró en evaluar la calidad de macizo rocoso junto con un análisis de estabilidad de la zona interior y exterior del paleoacantilado ubicado al sureste del cráter volcánico Rano Raraku, ya que éste se vio afectado parcialmente por el incendio.

Inicialmente se realizó una recopilación bibliográfica de estudios geológicos previos realizados de la isla, y con enfoque más específico de la zona de estudio. Posteriormente, se efectuaron labores en terreno, que incluyeron la identificación y medición de discontinuidades, con el propósito de clasificar la calidad del macizo rocoso a través de los métodos geotécnicos GSI (Geological Strength Index) y RMR (Rock Mass Rating), y el uso de software Rocscience (Rocfall y Dips) para determinar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y simular potenciales caídas. Los resultados preliminares obtenidos de este estudio indican que la estructura rocosa del paleoacantilado de Rano Raraku se encuentra en una calidad regular a lo largo de parte interior y exterior del paleoacantilado, lo cual lo hace propenso a sufrir algún tipo de proceso de remoción en masa, en particular a la caída de rocas según lo observado en terreno. No obstante, es fundamental realizar análisis de mayor detalle para tomar acciones de resguardo para la comunidad y los turistas.

Palabras Clave: Rapa Nui, Peligros Geológicos, Geotecnia, Macizo Rocos, Rano Raraku.

Agradecimientos: Agradecimientos a la Profesora Laura Becerril por apoyo académico. A la Profesora Ana Yáñez por ayuda en análisis. Al Arqueólogo Isaías Hey, CONAF Rapa Nui y Voluntariado Científico 2023 su colaboración.

Referencias:

- Universidad Católica de Temuco. Laboratorio de Planificación Territorial, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa) e Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2022-02-28) Atlas Rural de Chile.
- González-Ferrán, O., Mazzuoli, R., & Lahsen, A. (2004). Geología del complejo volcánico Isla de Pascua-Rapa Nui, Chile. V Región-Valparaíso.
- Salina, G. (2022). Rapa Nui reabrió al turismo con primeros visitantes - Blog Trade News. Blog Trade News. <https://tradenews.chile.travel/rapa-nui-reabrioturismo/#:~:text=En%202019%2C%20antes%20de%20la,llegaron%20directamente%20desde%20el%20extranjero.> (2022, 8 agosto)

Hacia una guía de caracterización dinámica de sitios y estandarización de los métodos de obtención de parámetro Vs30 y Tg para clasificación sísmica de sitios - Proyecto Fondef ID22110032

Esteban Saez¹, Gonzalo Montalva², Felipe Leyton Flórez³, Cesar Rodrigo Pasten Puchi³, Juan Carlos Tiznado¹, Francisco Ruz⁴, Oscar Taiba⁵

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Estructural y Geotécnica, Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Ingeniería Civil, Ingeniería, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile

(3) Universidad de Chile, Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(4) RyV Ingenieros, Licenciado de las Peñas 4909, Ñuñoa, Santiago, Chile

(5) Ferrara Proyectos Especiales, Avenida Ossa N°235, Oficina 1150, La Reina, Santiago, Chile

El movimiento sísmico percibido en cualquier punto resulta de la combinación de una serie de elementos, uno de ellos tiene que ver con filtrado y modulación de las ondas sísmicas por las características particulares de los suelos que conforman un determinado sitio. Este efecto se denomina “efecto de sitio”, ya que puede variar fuertemente de un punto a otro. La normativa sísmica ha desarrollado por años sistemas de clasificación de sitios que intentan agruparlos de manera de anticipar estos efectos e integrarlos al proceso de diseño.

En sus inicios, las técnicas de clasificación de sitios se apoyaron fuertemente en exploración invasiva o directa, sin embargo, la tendencia internacional ha ido evolucionando hacia una caracterización orientada a determinar propiedades dinámicas, las cuales son posibles de obtener mediante técnicas geofísicas no invasivas. Si bien por años las técnicas de exploración geofísica sísmica estuvieron basadas en ondas de cuerpo P y S, actualmente, los procedimientos de uso más frecuente están basados en Métodos de Ondas de Superficie (MOS). Una de las principales razones para ello es que los MOS permiten emplear el ruido sísmico ambiental y evitan tener que recurrir a sofisticados y costosos sistemas de inducción de vibraciones. Además, permiten explorar profundidades significativamente mayores.

La normativa nacional se ha alineado con estos desarrollos introduciendo desde el año 2011 la estimación del promedio de la velocidad de onda de corte en los 30 primeros metros (Vs30) y en su nueva versión la estimación del periodo de vibrar del sitio (Tg) mediante la técnica de la razón espectral H/V. Sin embargo, a la fecha no existe una metodología estandarizada (e.g., norma, guía o manual), específicamente adaptada para el contexto de los suelos chilenos, que permita obtener los parámetros de clasificación Vs30 y Tg.

Para resolver el problema identificado y subsanar las necesidades del mundo profesional, el proyecto Fondef ID22110032 está desarrollando una *Guía de caracterización sísmica de sitios* y un anteproyecto de norma de *Obtención de parámetro Vs y Tg basado en técnicas de ondas de superficie para clasificación sísmica de sitios*. La Guía, como primer resultado del proyecto, tiene por objetivo unificar el estado de conocimiento de las técnicas basadas en MOS en un documento diseñado para facilitar la transferencia hacia el mundo profesional y establecer indicadores de incertidumbre en sus resultados. Este documento tiene por alcance no sólo discutir en detalle la obtención de los parámetros normativos vigentes, sino que también preparar las bases para futuras evoluciones que pueda tener dicha normativa y caracterizaciones e interpretación de situaciones que por su naturaleza escapen a la normativa.

Si bien la Guía constituirá un documento valioso que favorecerá el adecuado empleo de MOS, existe una necesidad inmediata de generar un Anteproyecto normativo relativo a la obtención de Vs y Tg “Técnicas Geofísicas Basadas en Ondas de Superficie para la caracterización dinámica de sitios”. El objetivo es generar, como segundo resultado del proyecto, un documento maduro y que sea factible de llevar a consulta pública en un plazo reducido, de forma de acelerar su promulgación. Este resultado será desarrollado en paralelo con la elaboración de la Guía, pues constituye una fracción del alcance que se le pretende dar a dicho documento.

Se presentan los avances a fecha del Proyecto que incluye la caracterización de sitios representativos entre VII y X región del país mediante ejercicios tipo *blind test* entre los equipos participantes del proyecto. Se discute sobre los rangos de exploración efectivamente logrados en cada tipología de suelo, en función de las técnicas empleadas así como el equipamiento utilizado. Se pone especial énfasis en la variabilidad de resultados y en las lecciones aprendidas que conduzcan hacia la estandarización de los procedimientos.

Palabras Clave: clasificación sísmica de sitios, métodos de ondas de superficie, periodo de vibrar de un sitio, vibraciones ambientales, efectos de sitio.

Financiamiento: Proyecto Fondef ID22110032.

Agradecimientos: Dirección Técnica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, RyV Ingenieros, Ferrara Proyectos Especiales.

De la Tierra a la Luna: Escaneo láser y modelamiento 3D de tubos de lava para análisis de habitabilidad lunar

Sarai Montañez-Muñoz¹, Sergio A. Sepúlveda¹, Glyn Williams-Jones¹, Behraad Bahreyni²

(1) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, 8888 University Drive, Burnaby, Canada

(2) Simon Fraser University, School of Mechatronic Systems Engineering, Faculty of Applied Sciences, 8888 University Drive, Burnaby, Canada

Uno de los principales desafíos para futuros asentamientos humanos a largo plazo en la Luna es la búsqueda de entornos seguros que ofrezcan condiciones habitables y protección ante riesgos como la radiación cósmica, los impactos de meteoritos y los cambios abruptos de temperatura, entre otros. En 2009, las imágenes proporcionadas por la misión SELENEKAGUYA permitieron detectar la presencia de agujeros semicirculares (skylights) en zonas volcánicas lunares. En los últimos años se ha determinado que algunas de estas zonas de colapso tienen continuación lateral, sugiriendo la presencia de grandes sistemas de tubos de lava bajo la superficie, los cuales podrían considerarse como potenciales refugios capaces de proteger a los futuros asentamientos de los riesgos en la superficie lunar. Es importante tener en cuenta que los tubos de lava pueden ser detectados gracias a diversos métodos geofísicos, y uno de los más importantes en el entorno lunar, debido a los grandes contrastes de densidad, es la gravimetría.

En este proyecto, se aplican las técnicas de modelamiento forward de gravedad y escaneo LiDAR con un sensor portátil (GeoSLAM ZEB Horizon) en el tubo de lava Ape Cave, ubicado en el flujo de lava Cave Basalt en el suroeste del Monte Santa Helena, en el estado de Washington, Estados Unidos. Este túnel natural de origen volcánico tiene cerca de 3.6 kilómetros de longitud y se considera uno de los tubos de lava intactos más largos y con mayor complejidad vertical del mundo, lo que lo convierte en un análogo de los potenciales tubos de lava lunares.

El GeoSLAM ZEB Horizon permite escanear en un rango de 100 metros con una resolución de hasta 6 mm en entornos simples y complejos. En este estudio se escanearon aproximadamente 3,5 km del tubo de lava en secciones de 100-150 m, lo permitió obtener 25 nubes de puntos (320 millones de puntos en total), las cuales se georeferenciaron con el uso de estaciones GPS locales y del Instituto Geodésico Nacional de Estados Unidos. Posteriormente, las nubes de puntos unidas se procesaron y limpiaron utilizando los software GeoSLAM Connect, Cloud Compare y Agisoft, resultando en el primer modelo tridimensional existente de Ape Cave con una resolución mínima de 4 cm, el cual se usó para la realización de modelos forward de gravedad. Esta investigación constituye un paso fundamental para la optimización en el diseño de los gravímetros (MEMS) que se utilizarán en futuras misiones a la Luna por parte de la Agencia Espacial Canadiense (CSA) para la detección de estructuras subsuperficiales.

Palabras Clave: LiDAR, MEMS, tubos de lava, Luna, Geoslam.

Agradecimientos: Agradecemos el financiamiento de la Canadian Space Agency, y a Gifford Pinchot National Forest por facilitar el acceso al sitio de estudio.

Análisis de megadeslizamientos y su relación con sismicidad cortical en el Sistema Estructural Pucuro, Región de Valparaíso

José Tomás Guillermo Urrejola Sanhueza¹, Sergio A. Sepúlveda¹⁻²⁻³, Luisa Pinto Lincoñir¹, Stella M. Moreiras⁴

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Simon Fraser University, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, 8888 University Drive, Burnaby, Canadá

(3) Universidad de O'Higgins, Escuela de Ingeniería, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(4) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, IANIGLA, Avenida Dr. Adrian Ruiz Leal M5500, Mendoza, Argentina

La región de Valparaíso entre los 32-33°S, Chile central, se ubica en el sector de transición entre la Depresión Central y una difusa segmentación entre la Cordillera de la Costa y Cordillera Principal. Esta configuración morfoestructural propende el desarrollo de deslizamientos debido a los cambios abruptos en la topografía y geomorfología. Otro elemento que incide en la susceptibilidad de colapsos de ladera es la actividad neotectónica del Sistema de Fallas Pucuro (SFP). Este emplaza una intensa alteración hidrotermal y una red de estructuras secundarias que se extienden hasta 5 km de las trazas de las fallas regionales, lo anterior implica que los macizos rocosos cercanos al SFP posean una baja calidad geotécnica.

Este trabajo se basó en la metodología propuesta por Junquera-Torrado et al. (2021). En primer lugar, se confeccionó un inventario de grandes deslizamientos entre los ríos Petorca y Aconcagua donde se identificó y determinó la distribución de los deslizamientos. Se obtuvieron parámetros morfométricos que se contrastan con la información geológica de la zona.

A partir del inventario, se seleccionaron algunos deslizamientos característicos, de acuerdo a accesibilidad y representatividad de distintas unidades geológicas para realizar una caracterización geotécnica de los macizos rocosos in-situ (RMR, GSI), así como ensayos triaxiales y de compresión simple en laboratorio. Los resultados de estos ensayos permitieron obtener valores de entrada de resistencia de los macizos para la generación de análisis de estabilidad de laderas 2D, en el Software Slide, para comprobar o refutar la participación de un agente sísmico como factor desencadenante de megadeslizamientos. Para los casos en que sí existe este vínculo, se caracterizaron las fuentes sismogénicas posibles en el SFP, en base a la distancia al deslizamiento y la magnitud de los potenciales sismos desestabilizadores.

El valor de este trabajo, aplicado al contexto geológico que rige en la zona, es que permite inferir procesos de remoción en masa vinculados a una fuente sismogénica en específico y permite también, determinar las aceleraciones mínimas sísmicas para generar estas inestabilidades. Esto es relevante para establecer el peligro asociado a los efectos cosísmicos del Sistema Estructural Pucuro, puesto que existen numerosos asentamientos urbanos y/o terrenos de uso agrícola que se encuentran en la región, por lo que una buena caracterización geotécnica permitirá reducir la incertidumbre ante posibles eventos telúricos y sus consecuencias directas.

Palabras Clave: Megadeslizamientos, Sistema de Fallas Pucuro, Sismicidad Cortical.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt 1200871 (L. Pinto).

Agradecimientos: Gracias a la totalidad del Equipo Mountain Building. También a Segundo, Don Pedro y José Luis, lugareños de la zona quienes nos facilitaron nuestra tarea en terreno.

Referencias:

- Charrier, R.; Ramos, V.; Tapia, F., Sagripanti, L. (2014). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37°S (Chile and Western Argentina). Geodynamic processes in the Andes of Central Chile and Argentina. The Geological Society of London 13–61.
- Estay, J. (2019). Tectónica activa en el borde occidental de la Cordillera Principal de Chile Central (29°-36°S). Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geología. Universidad de Chile.
- Jara, P., Charrier, R. (2014). Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. Andean Geology, 41(1), 174-209.
- Junquera-Torrado, S., Moreiras, S.M., Rodríguez-Peces, M.J. et al. (2021). Linking earthquake triggered paleolandslides to their seismic source and to the possible seismic event that originated them in a portion of the Argentine Precordillera (31°–33°S). Nat Hazards 106, 43–78.
- Moscoso, R., Padilla, H., y Rivano, S. (1982). Carta Geológica de Chile, Hoja de Los Andes. Escala 1:250.000 (N° 52).
- Urrejola-Sanhueza, J.T. (2022). Análisis estructural mediante magnetotelúrica del Sistema de fallas Pucuro entre el Estero San Francisco y el Río Aconcagua, V Región. Memoria de Título. Inédito. Universidad de Chile.

Análisis numérico del daño generado por la tronadura de contorno, rol de las condiciones geotécnicas del macizo rocoso en estos resultados. Minera Zaldívar

Héctor Villalobos¹, Alejandro Kriman¹, Felipe Orellana²

(1) Enaex Servicios S.A., Gerencia EMTS, El Trovador 4253, Santiago, Chile

(2) Itasca, Geotecnia, Pedro de Valdivia 291, Santiago, Chile

En Minera Zaldívar, la búsqueda de la optimización del diseño de tronadura de contorno, para el control de daño y cumplimiento de los parámetros de diseño de los taludes, es parte de un lineamiento de carácter corporativo de Antofagasta Minerals. Por esta razón, Enaex en conjunto con Itasca, desarrolló un análisis numérico de los diseños de P&T aplicados en fase 8 de esta mina, sector que presenta desviaciones en el cumplimiento banco-berma y cuyos resultados obtenidos no cumplen con los criterios de aceptabilidad geotécnicos y de seguridad, definidos. Este estudio se enfocó, específicamente, en comprender el real impacto de las condiciones geotécnicas del macizo rocoso tronado, para la obtención de los parámetros de diseño banco-berma.

La condición geotécnica en taludes mineros en roca, si bien es multifactorial, el daño por tronadura toma relevancia sí considerando su carácter exógeno y por lo tanto candidato para programas de optimización del diseño de taludes mediante el control del proceso de Perforación y Tronadura (P&T). Si bien durante las últimas décadas ha existido un desarrollo sostenido en la ciencia de los explosivos y en el mundo de la perforación, la conexión entre los parámetros de diseño de P&T con la mecánica de rocas y los fenómenos que ahí ocurren han venido desarrollándose a una menor velocidad.

Este trabajo intenta conjugar parámetros de P&T con la mecánica de rocas mediante la utilización de un software de modelamiento numérico denominado Blo-Up (Itasca, 2009), el cual combina métodos continuos y discontinuos para simular la tronadura de un sector específico de la Mina Zaldívar propiedad de Antofagasta Minerals. El análisis contempla una etapa de calibración de la tronadura de precorte mediante el registro de velocidades de partícula y la energía equivalente. Posteriormente, el modelo intenta reproducir la geometría de la pared resultante después de la tronadura de producción comparando parámetros tales como pérdida de cresta, activación de mecanismos estructurales, ángulo de cara de banco, etc.

Los resultados entregados por los modelos numéricos y el análisis cinemático, permitió identificar el impacto real de la voladura, como también el rol de las condiciones estructurales y competencia del macizo rocoso, en conseguir los parámetros banco-berma. Las directrices derivadas de este estudio fueron plasmadas en recomendaciones al diseño de P&T tendientes a minimizar el daño en el talud considerando la calidad del macizo rocoso y la condición estructural propias del sector.

Palabras Clave: Parámetros de diseño banco-berma, Daño sobre macizo rocoso, Modelamiento numérico de tronadura.

Financiamiento: por empresa Enaex.

Agradecimientos: Superintendencia de Perforación y Tronadura de minera Zaldívar y Equipo Enaex Zaldívar y gerencia EMTS Enaex, por dar soporte a la esta investigación.

Referencias:

- Itasca, 2018. Estudio de modelamiento numérico Blo up, Minera Los pelambres.
- ENAEX. Informes Internos.

La importancia de un manejo integrado de geotecnia y tronadura, en la construcción de taludes

Héctor Villalobos K.¹

(1) Enaex Servicios S.A., Gerencia EMTS, El Trovador 4253, Santiago, Chile

El manejo oportuno de inestabilidades en la construcción de taludes es clave en el control de riesgos asociados a las operaciones y en el cumplimiento de los planes mineros.

Las desviaciones geológicas que se presentan en la construcción de taludes, característica propia de los macizos rocosos, exige no sólo la revisión y validación de los parámetros de diseño minero definido en etapas tempranas del proyecto, sino también, la de prácticas operacionales tan fundamentales como el proceso de tronadura, actividad primaria en el proceso de conminución y en la construcción segura de los taludes

En este documento se presentan casos de manejo geotécnico preventivo de inestabilidades identificadas tempranamente, donde un trabajo en conjunto con tronadura permite el control de los riesgos asociados, reducción del impacto de estas desviaciones geotécnicas en el plan minero y continuidad operacional en el desarrollo de las fases o taludes comprometidos.

Parte de la metodología desarrollada considera la siguiente secuencia de trabajos geotécnicos y de tronadura, que en algunos casos no son convencionales.

1. Mapeo y caracterización geotécnica continua del macizo rocoso, con seguimiento banco a banco.
2. Interpretación e identificación de inestabilidades y actualización de modelos estructurales y de calidad de macizo rocoso.
3. Análisis de estabilidad y desarrollo de instrumentación y monitoreo geotécnico específico para el manejo de la desviación geotécnica.
4. Desarrollo de criterios de seguridad en el análisis de datos de monitoreo geotécnico
5. Revisión y modificación de diseño de talud
6. Soporte geotécnico al diseño de tronadura de contorno y ejecución con control de daño sobre el 90%
7. Diseño y ejecución de tronadura para descarga y/o eliminación de inestabilidad
8. Entrega de recomendaciones geotécnicas y pautas de seguridad
9. Supervisión y manejo geotécnico de los casos en terreno
10. Difusión y charlas del plan de trabajo, donde se presenta el respaldo técnico y controles de seguridad de cada caso a las distintas unidades operativas.

El manejo geotécnico preventivo de estos casos permitió obtener los siguientes resultados:

- Manejo de inestabilidades con cero accidentes.
- Recuperación de pérdida de mineral comprometida por la inestabilidad.
- Desarrollo de prácticas geotécnicas no convencionales, como oportunidad de optimización de parámetros de diseño de taludes y del negocio minero.
- Trabajo en equipo de unidades Geotécnica & Tronadura como práctica fundamental para el manejo preventivo de desviaciones geológicas.
- Cumplimiento de plan minero.

Palabras Clave: Desviaciones geológicas y/o inestabilidades, Parámetros de diseño de taludes, Prácticas operacionales no convencionales, Manejo geotécnico preventivo.

Financiamiento: Por la empresa Enaex.

Agradecimientos: Agradecimiento a: Carlos Reinking de CMP y Empresa Enaex por el respaldo en la publicación de este trabajo.

Referencias:

- Informes Geotécnicos Internos de Empresa 3G Ltda. Informes Geotécnicos internos Mina El Soldado, 2007 Ingeniería Geológica, González de Vallejos, 2004.

Geología Forense en Chile: Fundamentos de una base científica para la justicia y las ciencias ambientales

Kristian Agurto-Velásquez¹, Katja Deckart¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

La Geología Forense, o Geoforense, es la aplicación de las herramientas disponibles en la geología para la resolución de casos policiales asociados a delitos y homicidios, en muchas ocasiones, con casos muy complejos de resolver. Es aquí donde, el análisis nanométrico de los suelos cumple un rol fundamental al proveer información atómica que puede ser útil para acotar zonas de crimen, o asociar un delito ambiental a un grupo o grupos de personas. La Geoforense es una rama emergente dentro de las Ciencias de la Tierra, y como tal, es un área de estudio de nulo conocimiento y desarrollo en Chile. En el mundo países como Inglaterra, Italia, Colombia y Brasil tienen avances importantes en peritajes y análisis químicos de suelos, desde donde se pueden rescatar bases científicas sólidas.

En reconocidas investigaciones realizadas en geoquímica ambiental y casos forenses, isótopos de $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ han permitido caracterizar, entre otras cosas, fuentes contaminadas naturalmente por percloratos lixiviados desde salares en el norte de Chile; con los isótopos de ^{18}O , ^{17}O y ^{16}O se ha determinado composición isotópica de dientes humanos para estudios de geolocalización, mientras que isótopos de ^{13}C junto a ^{15}N han permitido caracterizar isotopía de algunos alimentos, origen de restos de papeles y celulosa encontrada en escenas del crimen, y trazar la variación isotópica del cabello humano. Por su parte, las razones inestables de $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ se han utilizado para discriminar fuentes naturales o antropogénicas de contaminación; y los isótopos estables de plomo ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , y ^{208}Pb han servido para caracterizar contaminación en suelos por derivados del petróleo.

Ante la ausencia de profesionales dedicados a la Geología Forense en Chile y la falta de un método científico específico para casos geoforenses y delitos medioambientales, se propone elaborar una metodología basada en análisis geoquímicos composicionales e isotopía estable (e inestable en el caso del Sr) de distintos suelos característicos de algunas zonas geográficas de Chile, con el objetivo de observar balance, mezcla y transporte con otros suelos y componentes químicos, considerando en la ecuación parámetros generales como clima, humedad y pluviosidad del ambiente. Existen instrumentos de alta resolución que serán útiles para el inicio de la metodología propuesta. El ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*) es ampliamente utilizado para la medición de isótopos estables de C, O y en algunos casos Sr, proveyendo información detallada a la escala de partes por millón (ppm) con tan solo analizar una poca cantidad de muestra. Por su parte, el IRMS (*Isotope Ratio Mass Spectrometer*) permite analizar la relación entre isótopos estables por medio de muestras sólidas como el suelo, considerando las diferencias con materiales orgánicos o restos biológicos y fósiles, para determinar entre otras cosas, estudios de origen de bebestibles, procesos metabólicos humanos, cambios estacionales y ambientales en las relaciones isotópicas, etc. Otras metodologías a evaluar son el QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) para isótopos de Sr, y TIMS (*Thermal Ionization Mass Spectrometer*) para isótopos de Pb estables; gracias a su alta resolución y resultados confiables y claros.

Con este análisis multiparamétrico, se espera elaborar una base de datos y mapas isotópicos que sirvan para la investigación geoquímica forense, con parámetros numéricos y gráficas unidas a un respectivo modelo metodológico piloto para futuras investigaciones. Esta investigación, pretende discutir como un suelo natural o trabajado antrópicamente contiene parámetros isotópicos únicos, y se vuelve anómalo geoquímica e isotópicamente al momento de agregar otro suelo, contaminantes particulados ambientales o compuestos degradados de seres humanos. Con los resultados esperados, se pretende establecer una clara hoja de ruta para análisis geoquímicos e isotópicos en casos forenses y delitos medioambientales a mediano plazo, desde el momento de levantar la muestra en terreno, hasta su procesamiento en laboratorio y síntesis de los resultados.

Esta nueva línea investigativa en las Ciencias de la Tierra en Chile, tiene como meta social aportar a las policías, ministerios y fiscalías, y como meta laboral insertar al/la geólogo/a como profesional competente de las ciencias geoforenses en departamentos académicos y laboratorios periciales. Con una metodología científica comprobable y respaldada por la academia, la Geología Forense avizora ser fundamental como línea transversal en medios de prueba en tribunales de justicia, y contribuir ampliamente a la resolución de secuestros, homicidios, tráfico de minerales y delitos medioambientales.

Palabras Clave: Geología Forense, Geoquímica, Isotopía Estable, Geociencia aplicada.

Financiamiento: Esta investigación es parte de la Beca de Doctorado Nacional otorgada por ANID, año 2023. Las pruebas isotópicas están financiadas por el Laboratorio de Minerales y Rocas de la Universidad Federal do Paraná, Brasil.

Agradecimientos: A la International Union of Geological Sciences (IUGS) y Geoforensic International Network (GIN) por revisar los avances, y brindar soporte institucional y académico para la Geoforense en Chile.

Referencias:

- Di Maggio, R. M., Donnelly, L. J., Al Naimi, K. S., Barone, P. M., Salvador, F. A. D., Dawson, L., . . . Forbes, S. (2017). Global developments in forensic geology [Article]. *Episodes*, 40(2), 120-131. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i2/017014>.
- Donnelly, L. J. (2017). Introduction: The Episodes themed issue on Forensic Geology and the IUGS Initiative on Forensic Geology [Editorial Material]. *Episodes*, 40(2), 96-105. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i2/017011>.
- Molina, C. M., Wisniewski, K. D., Drake, J., Baena, A., Guatame, A., & Pringle, J. K. (2020). Testing Application of Geographical Information Systems, Forensic Geomorphology and Electrical Resistivity Tomography to Investigate Clandestine Grave Sites in Colombia, South America [Article]. *Journal of Forensic Sciences*, 65(1), 266-273. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14168>.
- Murray, Raymond C. & Tedrow, John C. F. (1975). *Forensic geology; earth sciences and criminal investigation*. New Brunswick, N.J: Rutgers University Press.
- Muhammad, S. A., Hayman, A. R., Van Hale, R., & Frew, R. D. (2015). Assessing Carbon and Hydrogen Isotopic Fractionation of Diesel Fuel n-alkanes During Progressive Evaporation [Article]. *Journal of Forensic Sciences*, 60, S56-S65. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.1255>.
- Ruffell, A. (2010). Forensic pedology, forensic geology, forensic geoscience, geoforensics and soil forensics [Review]. *Forensic Science International*, 202(1-3), 9-12. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.044>.

Evolución de material particulado MP_{2.5} de la ciudad de Coyhaique y su relación con potenciales fuentes corticales

Maritza Fernanda Aránguiz Ojeda¹, Ana Verónica Valdés Durán², Dante Daniel Cáceres Lillo³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Departamento de Tecnologías Nucleares, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Las Condes, Santiago, Chile

(3) Escuela de Salud Pública, Programa de Salud Ambiental, Facultad de Medicina, Santiago, Chile

Introducción

La ciudad de Coyhaique actualmente enfrenta un complejo escenario de contaminación atmosférica, que la ha catalogado como una de las ciudades más contaminadas por material particulado fino (2,5 µm) en Latinoamérica (OMS, 2016). Este fenómeno se ve propiciado por el clima, relieve montañoso y la quema de leña como principal fuente de calefacción (Pérez y otros, 2020).

En Chile, las normas primarias de calidad del aire establecen que las concentraciones de MP_{2.5}, no deben superar el valor promedio anual de 20 µg/m³ y el valor promedio de 24 horas de 50 µg/m³ (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2011). Para regular que estas normas se cumplan el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) ha habilitado dos estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos que son parte del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), estas corresponden a la "Estación Coyhaique: COYI" y "Estación Coyhaique II: COYII", operativas desde el año 2013. Desde ese entonces, diversos investigadores han utilizado los datos proporcionados por la red SINCA para comprender cómo se comporta diaria- y temporalmente la contaminación ambiental (atmosférica) de MP_{2.5} en la ciudad.

En este contexto, Solís (2021), lleva a cabo un análisis sobre la evolución de los registros de las concentraciones del MP₁₀ y MP_{2.5} entre los años 2013 al 2020, donde reporta, que el MP en su mayoría corresponde a MP_{2.5}, que las mayores concentraciones de MP_{2.5} ocurren en las estaciones de otoño e invierno, y también durante el día preferentemente en las mañanas y anocheceres. Adicionalmente, el autor sostiene que las concentraciones de este contaminante tienen en general, una tendencia a decrecer desde 2013 al 2020.

Considerando los antecedentes previos, el objetivo de este estudio fue extender el análisis realizado por Solís (2021) y completar la década de evolución de MP_{2.5}, a partir de los datos disponibles de los años 2021 al 2023 en las estaciones COYI y COYII.

Metodología

Se accedió a los datos disponibles en línea de la red SINCA de los años en estudio y se realizó un análisis a través de una serie de gráficos en el programa RStudio junto a la librería complementaria de ggplot.

Respetando los criterios establecidos por Solís (2021), que implican excluir aquellos datos donde la razón MP_{2.5}/MP₁₀ >1, datos igual a cero o negativos. Para las variables meteorológicas, se eliminaron aquellos datos de direcciones del viento que fuesen mayores a 360° o negativas, y humedades relativas mayores 100% o negativas.

Resultados

Entre los años 2021 al 2022 el comportamiento horario y estacional del MP_{2.5} se ha mantenido constante respecto a lo identificado por Solís (2021) para los años 2013 al 2020, con altas concentraciones en las mañanas y anocheceres, así como en los meses de otoño e invierno.

Respecto al promedio anual de MP_{2.5}, en 2021 se tiene un 35,2 µg/m³ en COYI y 36,7 µg/m³ en COYII, para el año 2022 se registra un 38,5 µg/m³ en COYI y 41,7 µg/m³ en COYII, ambos años están 76,0% y 83,6% por sobre la normativa actual, respectivamente. Actualmente, el año 2023 sólo cuenta con registros validados hasta el 02 de marzo, considerando esta fecha se tiene para el año 2023, una media de 3,98 µg/m³ en COYI y 6,2 µg/m³ en COYII. La media en COYI para el 2023 es hasta dos veces menor que la registrada en el mismo período de tiempo en 2021 y 2022.

Respecto a las variables climáticas, estas indican condiciones favorables para el aumento de concentración de MP_{2.5} en los meses de otoño e invierno de 2022 con alta humedad relativa y bajas temperaturas.

Discusión y Conclusiones

Según lo establecido por Solís (2021), las concentraciones de MP_{2.5} del año 2021 seguirían un comportamiento similar a los años anteriores con tendencia a la baja del promedio anual. No así, el año 2022 que presenta un aumento en los promedios anuales, lo cual podría explicarse por las temperaturas bajas, baja velocidad de viento y alta humedad relativa de ese año. Se requiere la existencia de registros validados de MP_{2.5} para el año 2023, ya que esto permitiría completar la década de datos.

Además de las variables climáticas, que condicionan el aumento de MP_{2.5}, Gallardo (2020) identifica que en los sectores sur y sureste de la ciudad se acumula más contaminación que el resto, debido al relieve montañoso que impide la dispersión de MP.

Actualmente, aún existen variables por analizar en cuanto a esta problemática ambiental, entre ellas conocer las concentraciones de metales y metaloides que componen el MP_{2.5}.

Resultados preliminares indican la presencia de elementos contaminantes, provenientes principalmente de aluminosilicatos, que constituyen las principales litologías en la localidad, lo que podría estar relacionado a un posible aporte cortical.

Palabras Clave: Material particulado, Contaminación, Clima, Coyhaique.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por proyecto "Innovación integral de Evaluación/Exposición a Contaminantes" del Programa Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) del Gobierno Regional de Aysén (GORE), CÓDIGO BIP:40010328-0 y Código GORE 3303404.

Referencias:

- Gallardo, E., 2020. Contaminación atmosférica en Coyhaique: factores condicionantes, características y comportamiento histórico espacial del MP10 y MP2.5. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 111 pp. Santiago.
- MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA., 2011. Decreto 12: Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP2.5, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. 16 pp. Santiago.
- Pérez, P., Menares, C., & Ramírez, C., 2020. PM2. 5 forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas. Urban Climate. Vol. 32.
- SOLÍS, R., 2021. Análisis de la calidad del aire en la ciudad más contaminada de Chile por material particulado fino: Coyhaique, Chile. Seminario para optar al título de Químico Ambiental. Facultad de Ciencias. 79 pp. Santiago.
- WHO GLOBAL URBAN AMBIENT AIR POLLUTION DATABASE, 2016.
- Zhang, Y., Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, C., Baklanov, A., 2012. Real-time air quality forecasting, part I: history, techniques and current status. Atmos. Environ. 60 632–655. Disponible en http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/.

Caracterización de metales y metaloides en el material particulado de la ciudad de Coyhaique, región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, Chile

Maritza Fernanda Aránguiz Ojeda¹, Ana Verónica Valdés Durán², Dante Daniel Cáceres Lillo³

(1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Departamento de Tecnologías Nucleares, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Las Condes, Santiago, Chile

(3) Escuela de Salud Pública, Programa de Salud Ambiental, Facultad de Medicina, Santiago, Chile

Introducción

La ciudad de Coyhaique capital de la región de Aysén, enfrenta desde hace más de una década una intensa contaminación por material particulado fino (MP_{2,5}), lo que conlleva a que en 2016 fuera declarada como zona saturada por MP_{2,5}. Esto derivó en una serie de esfuerzos por parte de las autoridades para desarrollar políticas públicas que apuntaran a disminuir esta problemática.

Dentro de las principales acciones tomadas por las autoridades, destaca la elaboración de un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) por parte del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), enfocado en cuatro ejes principales: el mejoramiento térmico de las viviendas, fomentar uso de combustibles limpios, utilizar calefacción eficiente y realizar difusión y educación ambiental (Silva y otros, 2017).

A esto se suma la elaboración de diversas investigaciones como las de Acuña (2014), Gallardo (2020), Muñoz & Cáceres (2020), Pérez y otros (2020), Solís (2021), Gómez (2022) y Ye-Li y otros (2022), que han permitido comprender que la contaminación de MP_{2,5} tiene un marcado comportamiento estacional y horario, que el clima tanto a escala local como regional puede favorecer o dificultar la dispersión de contaminantes, y también cómo esta contaminación ha impactado en la salud de la población, evidenciado en el aumento de consultas por enfermedades respiratorias e incluso de consultas por cáncer cardiopulmonar (Acuña, 2014; Muñoz & Cáceres, 2020; Ye-Li y otros, 2022).

Si bien existen diversos aportes científicos para la comprensión de esta problemática, hasta ahora no se han realizado estudios acabados sobre la composición elemental de MP_{2,5} en la ciudad de Coyhaique, que permitan estimar el posible riesgo por la exposición a los compuestos presentes en el material particulado, tanto a nivel ambiental, como intradomiciliario. El principal objetivo de esta investigación es caracterizar los metales y metaloides presentes en el MP_{2,5}. Mientras, que los objetivos secundarios son: i) comparar los niveles de metales tanto dentro como fuera de las casas, ii) evaluar cómo el clima y geomorfología local de la ciudad influyen en la dispersión de estos contaminantes.

Antecedentes de la zona de estudio

Clima

A escala regional, en la Patagonia domina la circulación general de vientos provenientes del oeste (Colwyn y otros, 2019). Estos vientos cargados de humedad oceánica interaccionan con la cordillera de los Andes Patagónicos, donde el alzamiento del aire húmedo sobre las altas topografías provoca precipitaciones orográficas (Garreaud y otros., 2013; Colwyn y otros 2019). Este fenómeno genera una importante variabilidad longitudinal de las precipitaciones en esta región (Viale y Garreaud, 2015 en Gómez, 2022) produciendo climas húmedos en el sector del barlovento que pueden alcanzar los 5.000 mm al año y zonas áridas frías en el sector del sotavento hacia la pampa Argentina (Colwyn y otros, 2019; Garreaud, 2018 en Gómez, 2022).

Coyhaique, se encuentra precisamente en una zona de transición climática, y según la clasificación climática de Köppen-Geiger (1980-2016), que utiliza las temperaturas y precipitaciones para caracterizar el clima, esta ciudad cuenta con un clima templado, sin estación seca con verano cálido y húmedo (CFb) (Beck y otros, 2018 en Gómez, 2022). La estación climática más antigua de la ciudad registra entre 1991 a 2019 una temperatura media anual de $8,2 \pm 0,5^\circ\text{C}$ y las precipitaciones anuales alcanzan los 1.025 ± 181 mm/año (Gómez, 2022).

Datos provenientes de la misma estación indican que entre 2011 a 2021, los vientos tienen una marcada disminución de la velocidad en los meses de invierno y otoño, con medias anuales de 2 m/s a 2.1 m/s, respectivamente, y una alta frecuencia en dirección noreste (NE). Por otro lado, en los meses de verano y primavera domina una frecuencia de vientos en dirección oeste-suroeste (W-SW), alcanzando velocidades máximas de 10.28 m/s y 16.96 m/s, respectivamente. La humedad relativa alcanza valores de entre 79% a 83% en los meses de otoño e invierno y apenas un 60% en verano y primavera.

Los procesos climáticos a escala regional propician la formación del fenómeno de inversión térmica, donde la temperatura del aire aumenta con la altura, en vez de disminuir (Ministerio del Medio Ambiente, 2016), esto a escala local conlleva a la inhibición de los procesos de ventilación y dispersión de contaminantes en la ciudad, lo que agudiza la contaminación por MP_{2,5} (Gómez, 2022).

Geomorfología local

La ciudad se emplaza en una depresión donde confluyen los ríos Simpson y Coyhaique, y se encuentra limitada tanto al norte como al sur por cuerpos montañosos. En la zona urbana de la ciudad, las elevaciones varían entre los 198 a 396 m s.n.m., mientras que las principales cumbres de la ciudad alcanzan los 1.663 m s.n.m. en los cordones subandinos orientales específicamente el cerro Cordillerano, y al sur el cordón Divisadero registra una elevación de 1.520 m s.n.m. y así como al norte el cerro Cinchao 1.361 m s.n.m.

Las menores elevaciones de la zona corresponden a los valles, destacando el valle abierto del río Simpson, de origen fluvio-glaciario, otros valles de menor magnitud corresponden al formado en el río Coyhaique de orientación E-W. Aledaños al curso del río Simpson y Coyhaique están dispuestos los llanos de sedimentación fluvial o aluvial formados por los cambios de nivel del río, lo que ha desarrollado diferentes terrazas o llanos fluviales, donde las terrazas más antiguas alcanzan una altitud de 388 m s.n.m. y 300 m s.n.m., respectivamente.

Las pendientes dentro de la ciudad van desde los 0 a 5,6° y estas aumentan gradualmente al acercarse las faldas de los cerros donde las pendientes varían entre los 16,8 a 28,4° en los piedemontes y ya más en la cima alcanzan los 28,4° a los 89,6°.

Todas estas características geomorfológicas locales podrían estar influyendo en la dispersión de la contaminación, ya que como Gallardo (2020) expone en su trabajo, los sectores sur y sureste de la ciudad, donde se encuentran las faldas de los cerros Mackay y Divisadero, se concentra la mayor contaminación de MP.

Fuentes de contaminación

Los contaminantes presentes en la atmósfera pueden originarse por procesos naturales (biológicos/geológicos) o debido a las actividades humanas, lo que define dos tipos de fuentes: naturales (biogénicas o geogénicas) y antropogénicas (Morata y otros, 2008). Esta última categoría a su vez puede subdividirse en fuentes fijas, móviles y fugitivas (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

En la ciudad de Coyhaique, se ha identificado que las principales actividades responsables de la emisión de $MP_{2,5}$ corresponden al uso de leña como combustión residencial (99,6%), fuentes móviles (0,2%), uso de calderas como fuentes fijas (0,12%), y quemas agrícolas y forestales (0,01%) (Silva y otros, 2017). Como medidas de mitigación al aporte de $MP_{2,5}$ la SEREMI del Medio Ambiente de Aysén ha desarrollado el programa de recambio de calefactores, donde las personas cambian estufas de combustión de leña por un sistema de calefacción de menor emisión en base a otro tipo de combustible principalmente pellets y kerosene (Silva y otros, 2017).

Hasta ahora, no existen estudios que evalúen la influencia de fuentes naturales, tanto de tipo biogénico (descomposición de vegetación) o geogénico (erosión de suelo o roca). En relación con este último, es importante señalar que las principales cumbres de la ciudad cuentan con amplias superficies de erosión, donde las litologías predominantes corresponden a rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición andesítica a riolítica con afloramientos locales de basaltos de olivino y clinopiroxeno. Por otro lado, en el sector del valle fluvial del río Simpson afloran principalmente lutitas negras marinas, mientras que en sector norte del río Coyhaique, casi al llegar a la confluencia de ambos ríos, afloran principalmente secuencias de areniscas fosilíferas. Todas estas litologías se encuentran expuestas a procesos de erosión y podrían estar presentes en el MP de la ciudad por transporte eólico.

Metodología

Los datos de $MP_{2,5}$ de este estudio provienen de dos fuentes: (1) campaña en terreno donde se tomaron muestras tanto dentro como fuera de las casas y (2) registros en línea de concentración de $MP_{2,5}$ y clima de la red SINCA para el periodo de muestreo.

La campaña de terreno se realizó entre febrero y marzo de 2022, donde se tomaron muestras en un total de 18 casas de la ciudad. Los criterios utilizados para la selección de viviendas fueron: (1) casas dentro de la zona saturada por $MP_{2,5}$, (2) casas acogidas o no al programa de recambio de calefactores y (3) casas acogidas o no al programa aislamiento térmico. Como se mencionó anteriormente, se ha identificado que la contaminación de $MP_{2,5}$ es más alta en algunos sectores de la ciudad, debido a esto para esta campaña, se realizó una zonificación de la ciudad en función de las diferencias de elevación y pendiente, así se dividió la ciudad en base a los siguientes rasgos geomorfológicos locales: centro de la ciudad, valle fluvial río Simpson, valle fluvial río Coyhaique, pie de monte cerro Mackay y pie de monte cerro Divisadero, así las casas seleccionadas luego fueron agrupadas según la zona a la hora de monitorear.

Para coleccionar el $MP_{2,5}$ se utilizaron los equipos Personal Environmental Monitor (PEM) y Environmental Particulate Air Monitor (EPAM5000), que coleccionan partículas en filtros de teflón de 37 mm y 47 mm, respectivamente con un flujo 4 L/min, estos estuvieron instalados por 48 horas en las viviendas seleccionadas. Posteriormente, los filtros fueron sometidos a análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF), donde se identificó un total de 36 metales y metaloides en concentraciones de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

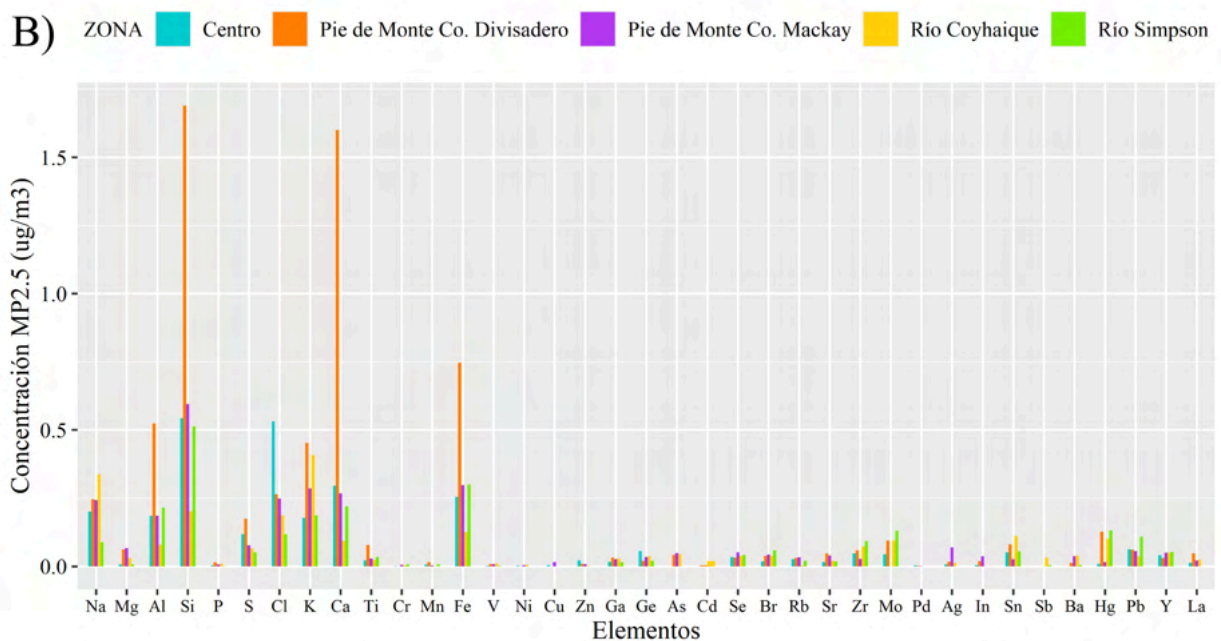
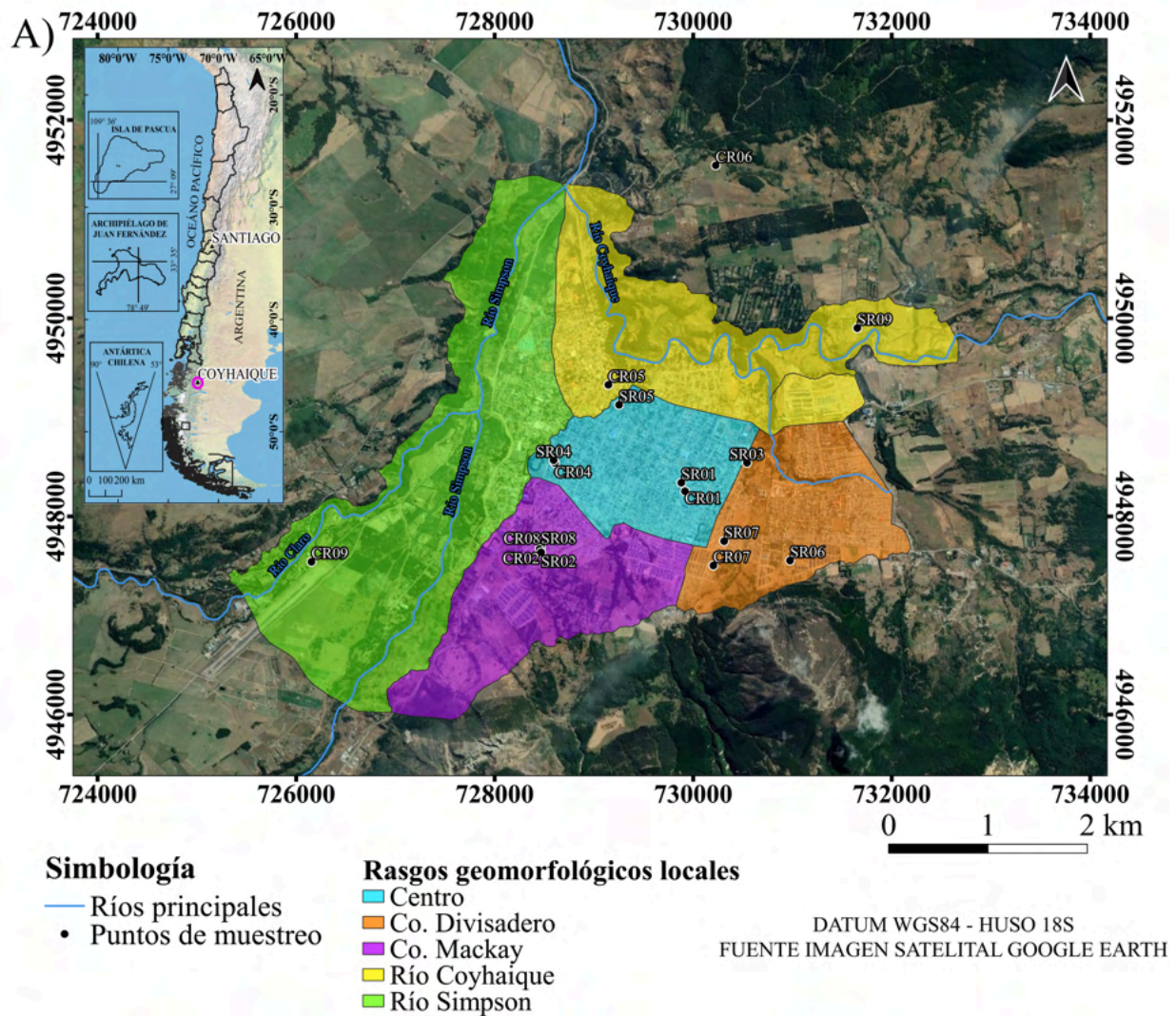
Una vez obtenida la base de datos de metales y metaloides en el $MP_{2,5}$, se procedió a elaborar una serie de gráficos utilizando el lenguaje de programación R y la librería complementaria ggplot, estos gráficos consisten en comparaciones de concentraciones de elementos mayores, traza y REE, dentro y fuera de las casas, y también por zona de la ciudad.

La información tanto de clima como de concentración de $MP_{2,5}$ obtenida de la red SINCA es analizada en profundidad en el trabajo presentado para este congreso por Aránguiz y otros (2022).

Resultados preliminares

El análisis de XRF revela la presencia de los siguientes metales y metaloides en el $MP_{2,5}$ de la ciudad de Coyhaique (1) elementos mayores: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, (2) elementos traza: Cu, Mo, Ni, Se, Zn, As, Cd, Hg, Sb, Pb, Rb, Sr, Zr, Ag, V, Ga, Ge, Br, Pd, In, Sn, Ba e Y, además de (3) Tierras raras: La.

De manera preliminar, se distingue que el contenido de elementos mayores y traza es mayor en el exterior que al interior de las casas. También, que existen altas concentraciones de K dentro de las casas, elemento indicativo de quema de biomasa (Valdés y otros, 2013).



A) Mapa de ubicación de la zona de estudio, puntos de muestreo y división geomorfológica local de la ciudad. **B)** Gráfico preliminar de metales y metaloides identificados y su concentración en ug/m³ por zona geomorfológica local.

Las viviendas ubicadas en zonas de piedemonte del cerro Divisadero presentan mayor contenido de elementos mayores como Al, Si, Ca, K y Fe que el resto de las casas. Para los elementos traza, existen concentraciones notables de Zr, Mo, Sn, Hg y Pb, como también de La, presentes preferentemente en la zona de valle fluvial del río Simpson (Ver figura).

Discusión y conclusiones

La contaminación de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique se debe principalmente a las actividades antrópicas de la comunidad, que utiliza leña como principal fuente de calefacción. A esto se suma las características geográficas y climáticas de la ciudad que no favorecen a la dispersión de este contaminante.

La incorporación de estaciones de monitoreo de la red SINCA constituye una importante herramienta para investigar el comportamiento evolutivo de la contaminación. Aún así, no basta con saber o registrar la cantidad de $MP_{2,5}$ en la atmósfera, si se desconoce su composición y, por ende, se desconoce los efectos que este pueda tener en las personas.

Los resultados preliminares de esta investigación señalan la presencia de diversos metales y metaloides en el $MP_{2,5}$, en el aire que hoy respira la comunidad de Coyhaique. Aún se requiere realizar un análisis profundo sobre las fuentes de proveniencia de estos metales y metaloides, y su relación con la geomorfología local.

Se espera a través de este trabajo, poder contribuir con el resto de las investigaciones preexistentes a poder abordar de mejor manera esta problemática ambiental que afecta no tan sólo a la ciudad de Coyhaique, sino a diversas comunas del país.

Palabras Clave: Material particulado, Metales, Metaloides, Contaminación, Coyhaique

Financiamiento: Memoria de título financiada por el proyecto "Innovación integral de Evaluación/Exposición a Contaminantes" del Programa Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) del Gobierno Regional de Aysén (GORE). CÓDIGO BIP:40010328-0 y Código GORE 3303404.

Agradecimientos: Agradecemos a los ciudadanos que permitieron realizar las mediciones de MP. También a Ana K. Maldonado y Macarena Barrera, SEREMI del Medio Ambiente, SEREMI de Salud y la Universidad de Aysén.

Referencias:

- Acuña, M., 2014. Impacto de la contaminación del aire por MP_{10} en la morbilidad por enfermedad respiratoria, cardiovascular y algunos cánceres en la población de Coyhaique, 2009-2014. Universidad de Chile.
- Muñoz-Ibáñez, F., & Cáceres-Lillo, D., 2020. Impacto del recambio de tecnología de calefacción en la concentración atmosférica por $MP_{2,5}$ y en las admisiones por urgencias respiratorias en Coyhaique, Chile.
- Colwyn, D., Brandon, M., Hren, M., Hourigan, J., Pacinil, A., Cosgrove, M. G., & Metzger, C., 2019. Growth and steady state of the Patagonian Andes. American Journal of Science, GALLARDO, E. 2020. Contaminación atmosférica en Coyhaique: factores condicionantes, características y comportamiento histórico espacial del MP_{10} y $MP_{2.5}$. Universidad de Chile.
- Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., & Rojas, M., 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. Journal of Climate. GÓMEZ, L. 2022. Caracterización meteorológica de los episodios extremos de contaminación por material particulado fino en Coyhaique, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2016. Guía de calidad del aire y educación ambiental. División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana.
- Pérez, P., Menares, C., & Ramírez, C., 2020. $PM_{2.5}$ forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas. Urban Climate.
- Silva, J., Rodríguez, M., Carrasco, I., Meyer, M. y Manríquez, N., 2017. Actualización del inventario de emisiones para la zona saturada de Coyhaique.
- Solís, R., 2021. Análisis de la calidad del aire en la ciudad más contaminada de Chile por material particulado fino: Coyhaique, Chile. Facultad de Ciencias.
- Valdés, A., Polvé, M., Muñoz, M., Toutain, J. & Morata, D., 2013. Geochemical Features of aerosols in Santiago de Chile from time series analysis. Environmental earth sciences.
- Li, Ye., Muñoz, F., Maldonado, Leiva, M., Valdés, A. & Cáceres, D., 2022. Cancer Burden Disease Attributable to $PM_{2.5}$ and Health Risk by $PM_{2.5}$ -bound Toxic Species in Two Urban Chilean Municipalities. Aerosol and Air Quality Research.

En la lupa Geoquímica: revelando la composición oculta de los suelos y sedimentos en áreas urbanas próximas al Complejo Industrial Ventanas, Puchuncaví, Chile

Cathalina Ballesteros Abarca¹, Camilo Sánchez Yañez¹⁻², Álvaro Navarrete Calvo¹⁻²

(1) Universidad Mayor, Geología, Facultad de Ciencias, Av. Manuel Montt 367, Providencia, Región Metropolitana, Chile

(2) Cobrizo - Geología Ambiental, Casa Matriz, Linares, Región del Maule, Chile

La creación de complejos industriales alrededor del mundo ha sido una forma indispensable para el desarrollo y crecimiento económico. Sin embargo, cuando éstos se encuentran inmersos en lugares urbanos o cercanos a ecosistemas altamente frágiles, pueden generar una serie de impactos ambientales negativos asociado a sus actividades, tales como: generación de residuos, contaminación del aire, agua, suelo o biota, entre otros. En Chile, los complejos industriales han dado lugar a diversas problemáticas socioambientales, normalizándose como "zonas de sacrificio", las cuales han afectado directa o indirectamente a las comunidades cercanas.

Un ejemplo de esto es la comuna de Puchuncaví, la cual desde el año 1960, ha albergado diversas industrias en el llamado Complejo Industrial Ventanas (CIV), el cual se encuentra aledaño a sectores urbanos como La Greda y Ventanas; en donde, además, se encuentra el humedal de Campiche-Los Maitenes. En estas localidades han ocurrido diversos eventos de intoxicación en la población, siendo el último el presente año, lo cual revela que los problemas de contaminación ambiental siguen vigentes.

Esta problemática se ha convertido en una fuente de conflicto socioambiental reconocido por el Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH), ya que se presume que la actividad industrial ha afectado gravemente la salud y calidad de vida de la población local. Además, la falta de información detallada sobre el tipo y distribución de especies potencialmente contaminantes tales como los metales prioritarios (As, Cu, Cr, Cd, Pb, Ag, Hg, Ni, Se, Ti, Zn) y otros contaminantes presentes en la zona de estudio es especialmente preocupante, debido a que estos elementos pueden ser tóxicos incluso en bajas concentraciones.

A pesar de estos antecedentes, aún no existen análisis sólidos de los contaminantes presentes en el agua, aire y suelos de la zona, y hasta la fecha no se han creado normativas que puedan regularizar la calidad del suelo (Ciper, 2022). En particular, el conocimiento de las características geoquímicas del suelo, como el fondo geoquímico y la definición de línea base composicional de la zona se han vuelto una necesidad, ya que nos permite tener una referencia sobre la composición natural del suelo antes de iniciarse la actividad industrial, y determinar cuánto ha influenciado la actividad antrópica en el suelo y sus posibles futuras afectaciones.

Si bien desde el año 1994, se promulgó la Ley 19.300, la cual tiene por objetivo asegurar que todas las personas tengan el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, se plantea que en la zona de estudio existe un enriquecimiento de contaminantes de origen antrópico, debido a la presencia del C.I.V.

Se propone adicionalmente realizar una estimación del impacto ecológico en los alrededores del C.I.V., por medio de la aplicación de los índices de contaminación tales como geo acumulación, enriquecimiento, riesgo ecológico, entre otros. Estos son ampliamente utilizados en estudios de impacto ambiental que combinan características naturales como el fondo geoquímico y valores estadísticos según modelos ecológicos.

Palabras Clave: Metales, Geoquímica, Contaminación, Suelos, Puchuncaví.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración del laboratorio del Centro de Nanotecnología Aplicada (CNAP) de la Universidad Mayor por el uso de su Instrumental de Microscopía electrónica de barrido.

Referencias:

- Cereceda-Balic, F., de la Gala-Morales, M., Palomo-Marín, R., Fadic, X., Vidal, V., Funes, M. & Pinilla-Gil, E. (2020). Spatial distribution, sources, and risk assessment of major ions and trace elements in rainwater at Puchuncaví Valley, Chile: the impact of industrial activities. *Atmospheric Pollution Research*.
- Lillo-Robles, F., Tapia-Gatica, J., Díaz-Siefer, P., Moya, H., Youton, C., Celis-Diez, J. L. & Neaman, A. (2020). Which soil Cu pool governs phytotoxicity in field-collected soils contaminated by copper smelting activities in central Chile? *Chemosphere*.
- Muñoz, A. A., Klock-Barra, K., Sheppard, P. R., Aguilera-Betti, I., Toledo-Guerrero, I., Christie, D. A. & Chávez, R. O. (2019). Multidecadal environmental pollution in a mega-industrial area in central Chile registered by tree rings. *Science of the Total Environment*.
- Rueda-Holgado, F., Calvo-Blázquez, L., Cereceda-Balic, F. & Pinilla-Gil, E. (2016). Temporal and spatial variation of trace elements in atmospheric deposition around the industrial area of Puchuncaví-Ventanas (Chile) and its influence on exceedances of lead and cadmium critical loads in soils. *Chemosphere*.
- Salmanighabeshi, S., Palomo-Marín, M. R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró-Rodríguez, C., Fadic-Ruiz, X. & Pinilla-Gil, E. (2015). Long-term assessment of ecological risk from deposition of elemental pollutants in the vicinity of the industrial area of Puchuncaví-Ventanas, central Chile. *Science of the total environment*.
- Segovia, M. (2022). Contraloría identifica graves omisiones y vacíos en el monitoreo de contaminantes en Quintero, Puchuncaví y Concón. CIPER Chile; Fundación CIPER, junio 2022.
- Zapata Aguiló, V. A. (2020). Análisis geoquímico y geoestadístico de la concentración elemental en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví.

Estudio ambiental del Lago Budi, Región de La Araucanía, Chile, a partir de su registro sedimentario

Cristian Andrés Bastías Curivil¹, Gabriel Easton¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Ercilla 803, Santiago, Chile

El Lago Budi es un cuerpo somero de agua salobre que se encuentra en el sector costero de la Región de la Araucanía, entre las comunas de Carahue, Saavedra y Teodoro Schmidt, y desemboca de manera esporádica en el Océano Pacífico a través de un río de nombre homónimo. En los alrededores de este lago habitan comunidades Mapuche y Lafkenche, para quienes este lago tiene una gran importancia económica y cultural. En términos ecológicos, los humedales ribereños al lago constituyen uno de los 64 Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad por la División de Recursos Naturales Renovables y Biodiversidad del Ministerio del Medio Ambiente a causa de la gran variedad de aves que viven en su cuenca.

La hoya hidrográfica del Lago Budi se localiza en la parte occidental de la Cordillera de la Costa, siendo la unidad morfoestructural dominante, constituida por rocas metamórficas del Paleozoico y del Triásico (metapelitas, metacherts, metabasitas, gneises y rocas ultramáficas) y rocas sedimentarias del Pleistoceno (coquinas, conglomerados coquínaceos, areniscas y conglomerados de niveles aterrazados emergidos), con altitudes máximas del orden de los 400 m s.n.m. hacia la zona oriental de la cuenca hídrica de este lago. En este sector del país, la Cordillera de la Costa progresivamente ha ido perdiendo altura, en comparación a las altitudes que más al norte desarrolla en la Cordillera de Nahuelbuta, llegando incluso al grado de permitir una coalescencia entre la Depresión Central con las Planicies Litorales, siendo notable dicha situación en los trayectos de los ríos Imperial y Toltén, entre los cuales se ubica el Lago Budi.

Esta investigación tiene por objetivo reconstruir la evolución ambiental reciente del Lago Budi, mediante el estudio de su registro sedimentario, junto con la posible relación existente entre la depositación de sedimentos en el mismo y la evolución del paisaje en su entorno. El análisis macroscópico de muestras de sedimentos extraídas en una campaña reciente (2023), evidencia sedimentos con facies predominantemente finas (tamaño arena fina, limo y arcillas), en general, de color oliva a marrón oscuro, con una fuerte presencia de material orgánico y, en las zonas de mayor profundidad del cuerpo de agua (7-8 m), facies muy oscuras y con un fuerte olor característico de condiciones hipóxicas a anóxicas. Además, a través de reconocimiento por buceo autónomo del fondo del lago se notó una turbiedad del agua misma asociada a una gran cantidad de materia orgánica y sedimento en general en suspensión, con una prácticamente ausencia de luz a 6-8 m de profundidad. Lo anterior sugiere que se están favoreciendo procesos de eutrofización y de anoxia de este lago, lo que podría impactar la ecología del mismo. En el sector occidental del lago, a profundidades menores a las anteriormente descritas, se encontraron organismos bentónicos de un tamaño menor a los 5 mm.

El estudio sedimentológico, mineralógico y geoquímico de las muestras superficiales, junto con el análisis de un testigo extraído del sector de mayor profundidad del lago, permitirá determinar una línea de base ambiental del mismo. Este estudio tiene el potencial de aportar con conocimientos científicos a la Asociación Budi Anumka (del Mapuzungun "Planta del Budi"), que es una organización mapuche formada en el 2020 por tres comunidades o Lof que la fundaron: Allipén, Llaguepulli y Malalhue-Chanko, todas ubicadas en el sector sur del Lago Budi, en la comuna de Teodoro Schmidt, Región de la Araucanía.

Palabras Clave: Geología Ambiental, Sedimentología, Limnología, Cosmovisión Mapuche.

Financiamiento: Beca Anid de Magíster Nacional, Beca de la Subdirección de Pueblos Indígenas de y Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Agradecimientos: A Fernando Quilaqueo, Ediel Lefiñanco y Óscar Carrillo.

Referencias:

- Beth, K. (2015). Variación espacial y temporal de la comunidad fitoplanctónica por variables físico-químicas del Lago Budi (38° 52'S; 73°18'W). Seminario de Título para optar al Título de Biólogo con mención en Medio Ambiente. Universidad de Chile.
- Catalán, L. (2010). Variación espacial y temporal (otoño - invierno) del Fitoplancton, y su relación con variables abióticas de un lago salino: lago Budi (38°52'S; 73° 18'W). Seminario de Título para optar al título de Biólogo con mención en Medio Ambiente, Universidad de Chile.
- Instituto Geográfico Militar. (2007). Puerto Saavedra [material cartográfico]. Lomnitz, C. (1968). Acerca de una curiosidad geológica chilena: Los orígenes del Lago Budi. En: Boletín de la Universidad de Chile (Número 82). Disponible en Biblioteca Central de la Facultad de Filosofía. Universidad de Chile.
- Lomnitz, C. (1969). Sea Floor Spreading as a Factor of Tectonic Evolution in Southern Chile. *Nature*, 222, 366–369. Ministerio del Medio Ambiente. (2010, noviembre 15). Instructivo N° 100143 "Sitios Prioritarios para la Conservación en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental". https://seia.sea.gob.cl/archivos/instructivo_sitios_prioritarios_actualizado_20101115.pdf.
- Peñaloza, T. (2022). Caracterización física y geoquímica de sedimentos activos en la cuenca hídrica del Lago Budi, Región de la Araucanía. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187108>.
- Quesille, M. (2022). Geomorfología y geoquímica de aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del lago Budi, Región de la Araucanía. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185795>.

Herramientas de análisis mineralógico para la identificación y diferenciación de restos de concentrado de escoria en suelos de zonas mineras

Dilan Campos Quiroz¹⁻², David Rubinos², Laura Hernández³, Óscar Jerez³, Felipe Saavedra Mella²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
(2) SMI-ICE-Chile, Rehabilitación Ambiental y Dinámicas Ecosistémicas, Apoquindo 2929, Las Condes, Santiago, Chile
(3) Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), Concepción, Chile

Las fundiciones y sus plantas de reprocesamiento desempeñan una función fundamental en la industria metalúrgica al facilitar la fusión, refinamiento y recuperación de metales valiosos. Sin embargo, estas operaciones también son las responsables de generar residuos como escorias y lodos, los cuales deben ser manejados y tratados de manera adecuada con el fin de reducir su impacto ambiental. El alcance que tienen estos impactos depende de diferentes factores, como el tamaño de los proyectos mineros, la tecnología empleada, la gestión ambiental y las prácticas que establece cada empresa minera. Este estudio tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de herramientas de análisis mineralógicos para identificar la presencia y las fuentes de restos de concentrado de escoria en suelos cercanos a zonas mineras. Para esto se analizaron muestras de concentrado de escoria de cobre y muestras de suelo de zonas aledañas a fundiciones, con el fin de identificar características que presente el concentrado de escoria y que puedan ser utilizadas como trazadores en estudios de análisis forense ambiental. Para caracterizar las muestras, se realizaron análisis detallados de la mineralogía y microestructura de los suelos y los residuos mineros, utilizando QEMSCAN®, SEM-EDS, microscopía óptica y análisis de imágenes SIAMS. Los resultados de la caracterización del concentrado de escoria confirmaron la presencia de minerales característicos de origen antropogénico atribuibles a procesos pirometalúrgicos, como la fayalita. Por su parte, en los suelos que se estudiaron se identificó la presencia de fayalita con una composición mineralógica, micromorfología y asociaciones mineralógicas consistentes con las que presenta el concentrado de escoria. En definitiva, los resultados de este trabajo muestran que aplicar herramientas de análisis mineralógico para trazar e identificar este tipo de residuos, permitiría trazar e identificar potenciales contaminantes liberados en eventos de contaminación relacionados con las fundiciones de cobre.

Palabras Clave: Mineralogía forense, Contaminación de suelos.

Análisis geoquímico preliminar de suelos y polvo sedimentado posterior a una tormenta de arena en Diego de Almagro, Región de Atacama, Chile

Winfred Espejo¹, Walter Espejo¹, José Celis², Walter Valdivia¹, Ignacia Hernández Gatica¹, Marco Sandoval¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencia Animal, Facultad de Ciencias Veterinarias, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

El análisis de muestras geoquímicas para estudios ambientales es útil para la determinación de una posible contaminación geológica o antropogénica. El análisis de los suelos y de roca madre es útil para evaluar el grado de enriquecimiento y contaminación de los suelos, permitiendo ser un indicador de evaluación de riesgo ambiental. Por su parte el análisis del polvo sedimentado (material fino), permite identificar si las partículas transportadas por el aire provienen de las unidades litológicas del entorno o han sido transportadas desde otros tipos de suelos. El análisis del polvo sedimentado, por ser material fino puede ser una fuente de exposición humana a metales. La evaluación del riesgo para la salud permite estimar a través de las concentraciones de los metales si es que existe un daño a la salud, incluso cancerígeno. Las tormentas de arena son eventos poco habituales, pero es probable que se incrementen debido al cambio climático. En el 2020, se produjo una tormenta de arena en la ciudad de Diego de Almagro, Región de Atacama, Chile. Se colectaron muestras de roca madre, suelos y polvo sedimentado de diferentes sectores de la ciudad de Diego de Almagro. Se analizaron las concentraciones de Cu, Co, Cr, Ni, Zn y Pb mediante espectrofotometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES). Adicionalmente, se realizó una caracterización física de los suelos y polvo sedimentado para determinar la fuente que lo origina, y así ver si corresponden al mismo tipo de suelos. Se observaron diferencias significativas entre la roca madre, suelos y polvo sedimentado en relación a las concentraciones de los diferentes elementos analizados. No hubo diferencias significativas entre las características físicas de los suelos y el polvo sedimentado, aunque sí se observó un enriquecimiento antropogénico en los suelos y polvo sedimentado respecto a la litología del entorno. Estos resultados preliminares son útiles para futuras evaluaciones de riesgo ambiental y sanitario sobre la exposición a suelos y polvos sedimentados presentes en la ciudad de Diego de Almagro, u otras que podrían verse afectadas por fenómenos similares.

Palabras Clave: Tormenta de arena, Diego de Almagro, geoquímica, Evaluación de riesgo, Polvo Sedimentado.

Financiamiento: Proyecto 2022000466-INI (W. Espejo) de la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción.

Primer Reporte de Elementos de Tierras Raras y Otros Elementos Químicos en Sedimentos de Ríos de Chile

Winfred Espejo¹, José E. Celis², Gustavo Chiang³, Christopher A. Celis⁴, Paulina Bahamonde⁵

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencia Animal, Facultad de Ciencias Veterinarias, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Facultad de Ciencias de la Vida, Santiago, Chile

(4) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile

(5) Universidad de Playa Ancha, Centro de Estudios Avanzados - HUB Ambiental UPLA, Valparaíso, Chile

El aumento de la demanda de tecnologías emergentes también ha incrementado la presencia de elementos de tierras raras y otros elementos menos conocidos en el medio ambiente. El objetivo de este estudio fue determinar el estado actual de cinco elementos de tierras raras como cerio (Ce), lantano (La), neodimio (Nd), praseodimio (Pr), itrio (Y) y elementos mayores y traza como bario (Ba), niobio (Nb), rubidio (Rb), torio (Th) y circonio (Zr). Durante 2019-2020, recolectamos 35 muestras de sedimentos superficiales (~50 gramos) de varios ríos a lo largo de Chile. Ríos del norte (Río Loa, Río Elqui, Río Choapa y Río Turbio) centro (Río Maipo, Río Trancura y Río Correntoso) y sur (Río Marchant, Río Bronce, Río Ukika y Río Robalo) de Chile. Los diferentes elementos químicos fueron analizados utilizando un espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva alimentado por batería (Thermo Scientific Niton XL3t 950 He GOLDD+). Los datos mostraron que el orden de abundancia de los elementos en los sedimentos del río fue Ba > Nd > Pr > La > Ce > Zr > Rb > Y > Th > Nb. Encontramos mayores contenidos de Ba, Ce, La, Nd y Pr en el norte y centro de Chile. Nuestros hallazgos mostraron que probablemente estos elementos químicos se absorben en los sedimentos, lo que podría facilitar la removilización a la columna de agua, siendo así más biodisponible para la biota. Considerando que los ríos del norte y centro de Chile suelen ser utilizados para el consumo humano y el riego, son necesarios más estudios para comprender los procesos involucrados en el reciclaje de elementos en las cuencas hidrográficas. Nuestros resultados pueden servir de base para los estudios de impacto ambiental que exige la legislación chilena antes de cualquier inversión productiva. Futuros estudios deberían considerar el análisis de testigos sedimentarios más profundos junto con técnicas de datación radioisotópica, necesarias para incrementar los datos sobre los procesos y fuentes implicados en el ciclo de los elementos químicos en las cuencas aquí estudiadas.

Palabras Clave: Río, Sedimento, Químicos, Chile.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del proyecto postdoctoral FONDECYT 3200302 (W. Espejo), FONDECYT Iniciación 11180914 ANID/BASAL FB210018 (P. Bahamonde) y la Iniciativa Científica Milenio NCN16_034 y NCN2021_056.

Análisis geoquímico preliminar de elementos de tierras raras en suelos urbanos de la ciudad de Chillán, Chile

Winfred Espejo¹, José Celis², Walter Valdivia¹, Marco Sandoval¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencia Animal, Facultad de Ciencias Veterinarias, Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

Los elementos de tierras raras corresponden a elementos químicos que antes estaban estables en la corteza terrestre y no presentaban gran valor comercial. Sin embargo, en la actualidad los elementos de tierras raras se están utilizando cada vez más en nuevas tecnologías y energías renovables. Por este motivo es importante evaluar la concentración de elementos de estas tierras raras en matrices ambientales. Las concentraciones de elementos químicos en suelos urbanos son útiles para evaluar la distribución según los diferentes usos de los suelos. Hasta nuestro conocimiento no existen investigaciones en Chile que hayan evaluado la distribución de elementos de tierras raras en suelos urbanos. La presente investigación evaluó las concentraciones de elementos de tierras raras en suelos urbanos de la ciudad de Chillán, Chile. Para ello, se utilizó una grilla representativa de toda la zona urbana, a través de la cual se lograron recolectar muestras cada 500 m. Las muestras de suelo fueron recolectadas con pala de mano y guardadas en bolsas de papel. En total se obtuvieron 174 muestras, las cuales se secaron y tamizaron. Posteriormente, se analizaron itrio (Y), lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), y neodimio (Nd) mediante un espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía alimentado por batería (Thermo Scientific Niton XL3t 950 He GOLDD+). Los resultados arrojaron las siguientes concentraciones en ppm peso seco: Y = $18,37 \pm 3,98$; La = $161,03 \pm 73,98$; Ce = $155,19 \pm 70,47$; Pr = $302,37 \pm 126,94$; Nd = $271,33 \pm 160,44$. En comparación con los suelos urbanos de la ciudad de Zhuzhou (China), las concentraciones de Y, La, Ce, Pr y Nd observadas en esta investigación fueron 1,2; 7,6; 3,6; 65,5 y 16,1 veces mayor, respectivamente. Estos datos preliminares pueden ser útiles para futuros estudios de evaluación del riesgo ambiental que busquen determinar el enriquecimiento geológico o antropogénico presente en estos suelos. Adicionalmente, estos datos pueden ser utilizados para estimar el riesgo para la salud humana.

Palabras Clave: Lantánidos, Uso de suelos, Geoquímica ambiental.

Financiamiento: Proyecto 2022000466-INI (W. Espejo) de la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción.

Geoquímica y mineralogía de los sedimentos del humedal Campiche - Los Maitenes en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, registros de eventos contaminantes

Bastián Espinoza Guajardo¹, Álvaro Navarrete²⁻³, Camilo Sánchez²⁻³

(1) Universidad Andrés Bello, Geología, Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Geología, Ingeniería, Av. Manuel Montt 318, Santiago, Chile

(3) Cobrizo - Geología Ambiental, Casa Matriz Linares, Región del Maule, Chile

En Puchuncaví, específicamente en la periferia del Complejo Industrial Ventanas (CIV), se encuentra el humedal Campiche - Los Maitenes, que alberga una rica biodiversidad de especies de plantas como el chagual o la sarcocornia, y aves como gaviotas, garzas o picaflones gigantes. Desde 1964, este humedal ha estado contiguo a un depósito de escorias de la planta de fundición de la zona. En los últimos años, se han llevado a cabo estudios hidroquímicos que han mostrado concentraciones anómalas de metales/metaloideos disueltos, tales como Fe, Cu, As, Mn y Mo (Cabrera, 2019). Además, se han realizado estudios geoquímicos de los sedimentos, detectándose altas concentraciones de metales y metaloides, algunos de los cuales exceden la norma internacional de calidad ambiental de sedimentos U.S Epa Residencial, como, por ejemplo, el Cr y As (Pérez, 2021) o se encuentran en concentraciones mayores a las indicadas por el MMA en el estudio PGS, (2015).

Sin embargo, estos estudios previos no han abordado la forma física en la que estos elementos se encuentran en el ambiente, es decir, aún no se sabe con claridad si estos contaminantes están presentes como una fase mineral específica o como material amorfo. Esta información es relevante, ya que puede proporcionar respuestas sobre el origen de los contaminantes, así como su comportamiento en el sistema, como su movilidad en el medio acuoso y su impacto en la salud del ecosistema local y de las personas, quienes podrían inhalarlos o consumirlos indirectamente.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es discutir la proveniencia y los procesos secundarios que dan lugar a la ocurrencia de estos contaminantes, mediante el estudio de la estructura interna de sedimentos, utilizando Difracción de Rayos X (DRX), lo cual permitirá determinar si las partículas de los sedimentos son estructuras minerales o amorfas. La granulometría y la composición química de la muestra se analizará mediante el método Tescan-Tima, debido a que los metales y metaloides tienden a concentrarse en los granos más finos del sedimento y su mineralogía, relacionada directamente con los datos obtenidos mediante DRX.

Los sedimentos se muestrearon en el humedal entre enero y abril de 2023, tomando en cuenta la ubicación de muestreo de estudios anteriores que mostraron índices de contaminación altos. Se extrajeron 9 muestras de la subsuperficie a diferentes profundidades: 10-20 cm y 30-40 cm, además de una muestra de eflorescencia superficial. De estas 10 muestras se seleccionaron 3 que, por su ubicación y según la bibliografía consultada, presentaban el índice de contaminación mas alto, por lo que fueron enviadas para el análisis Tescan-Tima.

Los resultados preliminares indicarían una presencia significativa de partículas amorfas y minerales con presencia de metales y metaloides como el Cu, Zn, Pb o As. Lo cual podría relacionarse con una contribución antropogénica del CIV en los sedimentos del humedal, donde la proveniencia de dichos elementos se ha mencionado en diversos estudios científicos (Chiang, 1985; González & Bergqvist, 1986; González & Ite, 1992; E.A. de Siegel & P.D. Siegel, 1995; Parra *et al.*, 2014; PGS, 2015; Poblete, 2015; Pérez, 2021).

Palabras Clave: Humedal, Escorial, Metales/Metaloides, Sedimentos, Contaminación.

Agradecimientos: Los autores reconocen el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio realizado.

Referencias:

- Cabrera, R. (2019). Caracterización hidroquímica del agua superficial en los humedales Campiche y Maitenes, Comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile. Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al título de geólogo.
- Chiang, J., Cornejo, P., López, J., & Romano, S. (1985). Determinación de cadmio, cobre, manganeso, plomo, hierro, zinc y arsénico en sedimento atmosférico en la zona de Quintero, V Región, Valparaíso, Chile. Boletín Sociedad Chilena de Química. Vol. 30, N°3, 139-158.
- E.A. de Siegel, & P.D. Siegel. (1995). ENAMI'S Ventanas smelter heavy metals pollution. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 9:2, 79-82.
- González, S., & Bergqvist, E. (1986). Evidencias de contaminación con metales pesados en un sector del secano costero de la V región. Agricultura Técnica (Chile), julio - septiembre de 1986, 46 (3), 299 - 306.
- González, S., & Ite, R. (1992). Acumulación metálica en suelo del área bajo la influencia de las chimeneas industriales de Ventanas, provincia de Valparaíso, V Región. Agricultura Técnica (Chile), abril-junio de 1992, 50 (2), 214 - 219.
- Parra, S.; Bravo, M. A.; Quiroz, W.; Moreno, T.; Karanasiou, A., Font, O.; . . . Cereceda, F. (2014). Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated soils by a copper smelting from different zones of the Puchuncaví Valley. Chemosphere, 513-521.
- Pérez, P. (2021). Anomalías geoquímicas y enriquecimiento secundario de metales pesados en sedimentos de los humedales Campiche, Los Maitenes, Puchuncaví, Región de Valparaíso, Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al título de geólogo.
- PGS. (2015). Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, Región de Valparaíso.
- Poblete, N., Macari, O., & Rodríguez, C. (2015). Enriquecimiento y distribución espacial de arsénico en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví. XIV Congreso Geológico Chileno, 288-291.

Transporte de sedimentos en suspensión, metales y metaloides desde fuentes geogénicas a escala de microcuencas proveedoras de agua potable rural. Cordillera de la Costa Valdivia – Corral

Tomás Fischer¹, Carlos Oyarzún Ortega¹, Christian Little¹, Pablo Iribarren Anacona¹, Hugo Bertín Kaimen¹⁻²

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Avenida Eduardo Morales Miranda Edificio Emilio Pugin, Valdivia, Chile.

(2) Centro de Estudios Científicos, Glaciología y Cambio Climático, Arturo Prat 514, Valdivia, Chile

Los metales y metaloides comprenden potenciales contaminantes críticos para la calidad del agua potable. Al no ser biodegradables, estos tienden a concentrarse en los sistemas acuáticos a largo plazo, pudiendo afectar la salud humana a muy bajas tasas de consumo. A escala de cuencas hidrográficas, los metales y metaloides se transportan hacia los cauces fluviales a través de la erosión y escorrentía superficial desde fuentes naturales geogénicas y antropogénicas (Lintern et al., 2018). Específicamente en el medio acuoso, la fracción de sólidos en suspensión corresponde al principal agente de movilización y reubicación de dichas especies, ya que regulan su intercambio entre la columna de agua y los sedimentos de fondo y el ingreso a las tramas tróficas (Nasrabadi et al., 2016, 2018), siendo por ende fundamental su estudio para gestionar la calidad del agua para consumo humano.

Estudiar la relación entre los flujos en suspensión y la concentración de metales y metaloides comprende un desafío técnico-económico importante, requiriéndose elaborar soluciones innovadoras para su monitoreo a través de estimaciones indirectas o *proxys*, cuyo desarrollo sigue siendo incipiente. Actualmente, en Chile no existen estudios que aborden dichos procesos a escala de micro-cuencas menores a 1000 hectáreas (Cuevas et al., 2018), las que generalmente en la zona centro-sur proveen de agua potable a las comunidades rurales. Si bien en el territorio rural el aporte desde fuentes antropogénicas es bajo, no se conoce bien cómo y cuánto influye la geoquímica natural de rocas y suelos en el flujo de metales y metaloides asociados a la carga en suspensión y procesos erosivos.

El objetivo de este trabajo es estudiar el transporte de metales y metaloides asociados a la carga en suspensión producida durante eventos de lluvia sobre pequeñas cuencas proveedoras de agua potable, que presentan distinto fondo geogénico y configuraciones de paisaje. Para ello se eligieron dos micro-cuencas ubicadas en la Cordillera de la Costa de la Región de Los Ríos, las cuales poseen metapelitas y granitoides como basamentos rocosos, respectivamente.

Durante el periodo húmedo, bajo distintas condiciones hidrológicas, se tomaron simultáneamente siete muestras instantáneas de agua superficial por cuenca para análisis de sólidos suspendidos y concentración total de metales y metaloides. Junto a ello se llevó a cabo un monitoreo continuo de la precipitación y escorrentía, y la medición de distintos parámetros fisicoquímicos *in situ*. Adicionalmente, se realizó una caracterización general de rocas y suelos, tomando cuatro muestras por cuenca para análisis de metales y metaloides. Finalmente, se evaluó la relación empírico-potencial entre la concentración en el agua de cada metal y metaloide reportado con la electro-conductividad, categoría litológica y las concentraciones instantáneas de sólidos suspendidos mediante modelos lineales de regresión múltiple (Fox, 2016).

Los modelos estadísticos exhibieron relaciones robustas entre la carga instantánea en suspensión y la concentración total de Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Ba y Pb, sugiriendo una fuerte afinidad por la fracción particulada, mientras que el Mg se asoció significativamente con la electro-conductividad, sugiriendo su presencia en el agua como iones disueltos. Adicionalmente, las litologías metapelíticas de la primera cuenca resultaron ser una fuente distintiva de Mg y Mn respecto a los granitoides de la segunda cuenca, siendo estos por su lado un aporte significativo de Ba.

Sobre los patrones geoquímicos en rocas y suelos, se señala que los metales y metaloides más comunes (Al, Fe, Mg, Mn), se asociaron a mayores concentraciones en el agua, seguidos subsecuentemente por metales y metaloides de carácter secundario y traza (Ba, Cr, Ni, Pb, Zn). Sumado a ello se propone que, dependiendo del contexto geogénico a escala de cada cuenca, la concentración específica de distintos metales y metaloides secundarios o traza en fases minerales determinadas, suelos, o estructuras geológicas, podría favorecer la exportación de dichos elementos a través de los cursos de agua.

Considerando normativas nacionales y estándares internacionales de calidad de agua potable, los metales y metaloides reportados para ambas cuencas se presentan en concentraciones en su mayoría óptimas. No obstante, el transporte de sólidos suspendidos y la carga de metales y metaloides asociados estaría en estrecha relación con las condiciones de crecida y la exposición de los suelos a la erosión pluvial (Oyarzún y Peña, 1995; Oyarzún et al., 2011); por lo tanto, se recomienda favorecer el desarrollo de cobertura boscosa nativa con el fin de regular la escorrentía y la exportación de sedimentos asociados a procesos erosivos (Banfield et al., 2018).

Palabras Claves: Metales y Metaloides, Sedimentos en Suspensión, Monitoreo Ambiental, Cuencas APR, Calidad de Agua Potable

Financiamiento: Instituto Forestal (INFOR), programa de investigación en cuencas de Agua Potable Rural (APR). Vicerrectoría de Investigación, Desarrollo y Creación Artística (VIDCA); Dirección de Estudios de Postgrado (DEPOST); Magíster en Ciencias mención Recursos Hídricos, Universidad Austral de Chile (UACH). Becas para Proyectos de Tesis de Postgrado, Proyecto BPM2022-01.

Agradecimientos: A los Comités de Agua Potable Rural de Niebla - Los Molinos y Chaihuín por facilitar el acceso a sus zonas de captación. A Nicolás Vergara Impellizzeri del CR2 por toda su colaboración.

Referencias:

- Banfield, C.C., Braun, A.C., Barra, R., Castillo, A., Vogt, J., 2018. Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. CATENA 161, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.017>.

- Cuevas, J.G., Little, C., Lobos, D., Lara, A., Pino, M., Acuña, A., 2018. Nutrient and sediment losses to streams after intervention of Eucalyptus plantations. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18, 576–596. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001702>.
- Fox, J., 2016. *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*, Third Edition. Sage Publications.
- Lintern, A., Webb, J.A., Ryu, D., Liu, S., Bende-Michl, U., Waters, D., Leahy, P., Wilson, P., Western, A.W., 2018. Key factors influencing differences in stream water quality across space. *WIREs Water* 5. <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>.
- Nasrabadi, T., Ruegner, H., Schwientek, M., Bennett, J., Fazel Valipour, S., Grathwohl, P., 2018. Bulk metal concentrations versus total suspended solids in rivers: Time-invariant & catchment-specific relationships. *PLOS ONE* 13, e0191314. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191314>.
- Nasrabadi, T., Ruegner, H., Sirdari, Z.Z., Schwientek, M., Grathwohl, P., 2016. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water. *Applied Geochemistry* 68, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.
- Oyarzún, C.E., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., Hervé, P., 2011. Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque (Valdivia)* 32, 10–19. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000100002>.
- Oyarzún, C.E., Peña, L., 1995. Soil erosion and overland flow in forested areas with pine plantations at coastal mountain range, central Chile. *Hydrological Processes* 9, 111–118. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090110>.

Suelos contaminados con metales y metaloides a través del método de extracción secuencial en Graneros. Una contribución para determinar disponibilidad y movilidad de Arsénico

Daniela Garrido Morales¹, Ana Valdés Durán², Mónica Antilén³

(1) Universidad de Chile, Química, Ciencias, Las Palmeras 3425, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Nueva Bilbao 12501 Las Condes, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Inorgánica, Facultad de Química y de Farmacia, Av. Vicuña Mackenna 4860 Macul, Santiago, Chile

Introducción

A través del tiempo se ha podido observar una constante degradación del suelo, manifestado como una serie de cambios físicos, químicos y/o biológicos en las propiedades y procesos edáficos, en donde la capacidad de producir bienes y servicios, actual y futura (Granados-Sánchez et al., 2013), se ha reducido debido a causas naturales como procesos inducidos por acciones y actividades humanas. Además, hay que tener una noción de aquellos elementos químicos que impactan negativamente el medio ambiente, ya que algunos metales y metaloides suponen un riesgo potencial a la naturaleza y a la sociedad dado que generan serios problemas a la salud humana y animal (Waisberg et al., 2003).

En el área económica de la geología, se ha utilizado mucho la geoquímica como herramienta para determinar la presencia de un yacimiento mineral, pero debido al agravamiento de los problemas ambientales (Oyarzún et al., 2010) surge el término de "Geoquímica Ambiental", la cual busca establecer y explicar las relaciones entre las composiciones químicas de la superficie de la Tierra y las fuentes potencialmente contaminantes. Aborda el estudio de las interacciones químicas entre la litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera, así como el impacto de las acciones humanas que llevan a la degradación del ambiente. En consecuencia, abarca temas referentes a la sostenibilidad y viabilidad de la especie humana en la Tierra, vinculadas a la salud humana, animal y vegetal, conociendo los diferentes factores que condicionan la fuente de contaminación, dispersión, movilidad, distribución y concentración de los elementos y compuestos químicos en los sistemas del ciclo biogeoquímico que los afecta (Oyarzún et al., 2010).

Naturalmente los metales y metaloides forman parte de la corteza terrestre, así como también un porcentaje proviene de actividades antrópicas, como la agricultura, a través del uso de pesticidas y fertilizantes, o a la minería, en especial para Chile, puesto que es una de las principales actividades económicas del país, pero que a su vez genera efectos negativos en el medio ambiente por la contaminación que produce. Debido a esto es importante conocer los efectos que tienen los metales y metaloides en el medio ambiente, para lo cual es importante conocer: i) su concentración total y ii) la especiación o formas químicas en que se encuentren, debido a que las distintas especies químicas tienen diferente movilidad, solubilidad y toxicidad. La especiación de un elemento está definida como la distribución de un elemento entre especies químicas de un mismo sistema (Templeton et al., 2000). Las especies químicas a su vez son la forma específica de un elemento concreto como composición isotópica, electrónica o estado de oxidación, y complejos o estructura molecular (Templeton et al., 2000). La concentración total incluye todas las formas en que se encuentra el elemento en el suelo, por ejemplo, unido a estructura cristalina de minerales primarios y secundarios, adsorbidos a la superficie de minerales secundarios como arcillas, óxidos y carbonatos, unidos a la materia orgánica, iones libres (Alloway, 2013). La concentración disponible incluye los iones libres, complejos solubles y formas lábiles (Rieuwerts et al., 1998).

En el estudio titulado "Línea Base Geoquímica Ambiental, Background y Fuentes de Metales y Metaloides presentes en Suelos Urbanos, Periurbanos y Rurales de la Región de O'Higgins, Chile (Valdés et al., 2021) se identificaron áreas geoquímicamente anómalas (desviación de los patrones geoquímicos considerados normales en un área) de concentración de As (134,6 ppm), cromo (206,6 ppm), y cobre (2500 ppm) entre otros elementos, por lo que surge la necesidad de evaluar la disponibilidad y movilidad de estos metales y metaloides en el suelo, de acuerdo con los antecedentes presentes y, por consiguiente, conocer en qué fracción del suelo (lábil o refractaria) se concentran estos elementos.

Debido a lo anterior, surge el presente estudio de Suelos Contaminados con Metales y Metaloides el cual se llevó a cabo en la región de O'Higgins, en el sector de Rancagua y Granero en donde, a través de la extracción secuencial, es posible conocer la afinidad de los metales en las distintas fases del suelo, con el objetivo de analizar la biodisponibilidad y movilidad de estos metales y metaloides en el suelo que se presentan en concentraciones geoquímicas anómalas y así poder representarlas a través de gráfico y tablas. La extracción secuencial es una técnica que permite entender como el total de un elemento se encuentra fraccionado o distribuido en el área de estudio, el procedimiento de extracción secuencial se basa en la digestión selectiva de algunos componentes de la muestra mediante el uso de distintos reactivos o extractantes, tales como agua, soluciones salinas, ácidos débiles, agentes quelantes, reductores y oxidantes. Así, se simulan procesos naturales tales como la complejación, acidificación, oxidación o reducción del medio. De esta forma, se puede identificar la fracción móvil y disponible (lábil) de la muestra según como se encuentre retenido el metal, de las no disponibles (refractaria).

Uno de los metales analizados y el cual se mencionará en este estudio es el As, el cual tiene 3 estados de oxidación As, As⁺³ y As⁺⁵. En solución, el As puede existir como arsenito (As⁺³), arseniato (As⁺⁵) y como varios complejos orgánicos. Los arseniatos inorgánicos forman sales con cationes de calcio y hierro. Los compuestos de As soluble son prontamente consumidos por organismos vivos y a concentraciones elevadas pueden ejercer efectos tóxicos. (Sancha et al., 2005). El extractante NaOH disuelve la fracción orgánica soluble en alcalinidad, lo que provoca que vaya liberando el metal que estaba retenido, y este se encuentra presente en la materia orgánica y el HNO₃ libera los metales asociados a óxidos y sulfuros que se encuentran en la estructura cristalina de algunos minerales.

Metodología

La metodología aplicada en este proyecto consistió en tomar 28 muestras de los horizontes superficiales (20 - 30 cm de profundidad) las cuales se tamizaron a 2 mm para los posteriores análisis, las cuales fueron colectadas en los puntos en donde se encontraron anomalías geoquímicas en el estudio de la "Línea Base Geoquímica Ambiental" mencionado anteriormente, estas muestras pasaron por el método de extracción secuencial, donde en cada una de ellas se pudo obtener la fracción química de los metales medidos, este procedimiento de extracción secuencial fue propuesto por Sposito et al. (1982) con sus respectivos duplicados. Con el fin de obtener la mayor cantidad de información y la posibilidad de medir estos elementos por ICP-MS en la CCHEN los elementos analizados fueron: Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Dy, Er y Yb; a los cuales se les realizó una validación de datos, eliminando así todos los que presentaban variables con un porcentaje de muestras con valores bajo el límite de cuantificación (<LC) mayor a un 70%, y para los elementos que poseen más del 30% de los datos con concentraciones por sobre el límite de cuantificación, el valor de los puntos bajo el límite de cuantificación es modificado por la mitad del valor del límite de detección. El fraccionamiento de metales pesados involucra las fracciones intercambiables, absorbidas, materia orgánicas, carbonatadas y sulfuradas, obtenidas con los extractantes KNO_3 , agua desionizada, NaOH , Na_2EDTA (o más conocido como EDTA que se utiliza como agente quelante) y HNO_3 respectivamente. Las muestras ya tratadas se seccionaron en muestras de 2 g, las cuales pasaron al procedimiento de extracción secuencial, en donde se trataron con 25 mL de los siguientes reactivos: KNO_3 0,5 mol/L mantenido en contacto durante 16 h; agua desionizada durante 2 h este paso de repite 3 veces, (los extractos se combinan generando un volumen total de 75 ml); solución de NaOH 0,5 mol/L durante 16 h; solución de Na_2EDTA 0,05 mol/L durante 6 h; y de HNO_3 4 mol/L a los 80°C durante 16 h. Después de cada extracción se centrifugó la suspensión y se filtró el sobrenadante a 0,22 micrones los que se almacenaron en viales con sus respectivos códigos y en refrigeración para el posterior análisis. El contenido de los metales en cada extracto se determinó mediante espectroscopía ICP-MS a excepción de la fracción de materia orgánica del extractante NaOH , que se midió por espectroscopía ICP-OES, todo esto en los laboratorios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). Esto permitió interpretar la información y resultados a través de gráficos y tablas.

Resultados y Discusión

Con la ubicación de los puntos muestreados, estos se pudieron asociar en grupos según el tipo de uso del suelo, donde se clasificaron en Frutícola, Pastizal, Maizal, Urbano y Distintos sitios. De las 28 muestras el 32% forma parte del grupo Frutícola, el 25% de Pastizal, el 18% a Distinto Sitios, el 14% a Maizal y el 11% a Urbano. Dentro de los resultados podemos hablar en particular del As como metal potencialmente contaminante. Los resultados de la extracción secuencial arrojaron que para el grupo de Frutícola, el 60,6% del As total es extraído por NaOH , el 39,3% es extraído por HNO_3 , un 0,007% por agua desionizada y un 0,003% por KNO_3 ; para el grupo de Pastizal el 65,9% del As total es extraído por NaOH , el 32,3% es extraído por HNO_3 , y un 1,3% por agua desionizada y un 0,4% por KNO_3 ; para el grupo de Maizal el 53,8% es extraído por HNO_3 , el 46,2% del As total es extraído por NaOH , y un 0,005% por agua desionizada y un 0,002% por KNO_3 ; para el grupo Urbano el 93,3% del As total es extraído por NaOH , el 6,6% es extraído por HNO_3 , y un 0,01% por agua desionizada y un 0,005% por KNO_3 y en el grupo de Distintos sitios 51,8% es extraído por HNO_3 , el 48,2% del As total es extraído por NaOH , y un 0,006% por agua desionizada y un 0,002% por KNO_3 .

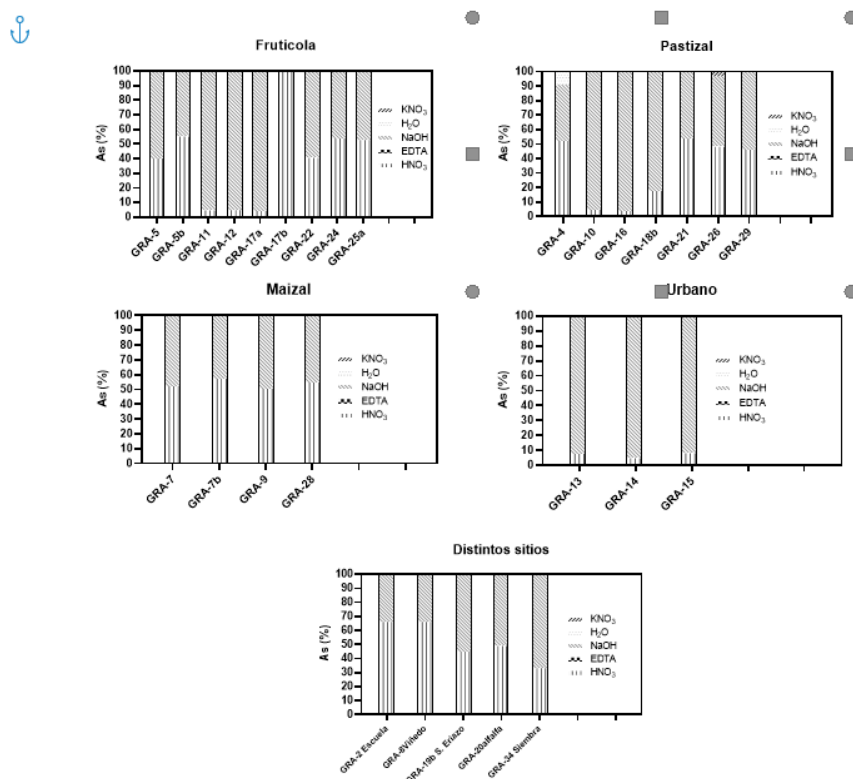


Figura 1: Gráficos de porcentaje de concentración de As analizados por extractante.

El NaOH y el HNO₃ son los dos extractantes con mayor porcentaje de concentración de As extraído en todos los grupos de muestras, esto quiere decir que es muy poco probable que se mueva y esté disponible ya que está en una fase refractaria, se podría hablar de que es parte de la composición mineralógica del suelo. El hecho de que los porcentajes de As extraído por las fracciones lábiles (KNO₃ y agua desionizada) sea tan bajos (0,002% - 0,01%) significa que la concentración que va a estar más disponible y móvil es muy pequeña en comparación a la concentración total extraída en las muestras.

Sabiendo esto, se puede observar una secuencia de los extractantes, debido a su abundancia de As en las distintas fracciones: HNO₃ > NaOH > Agua desionizada > KNO₃ > Na₂EDTA. Además, haciendo una comparación con las normativas internacionales se puede observar que todas las muestras obtenidas y analizadas se encuentran por sobre los valores definidos como aceptables en las distintas normativas como la canadiense y alemana.

Palabras Clave: extracción secuencial, metales y metaloides, movilidad, disponibilidad.

Financiamiento: Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el proyecto UC-CCHEN de la Facultad de Química y de Farmacia. Fuente de financiamiento: CONICYT + PAI/INSERCIÓN EN EL SECTOR PRODUCTIVO, SEGUNDA CONVOCATORIA 2018 Folio + (7818I20011).

Agradecimientos: Gracias al equipo de laboratorio de la Facultad de Química y Farmacia de la universidad católica de Chile, a Josefa Velásquez y Marco Acuña de CCHEN y al laboratorio de recursos tecnológicos de CCHEN.

Referencias:

- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (B. J. Alloway, Ed.; Third Edition, Vol. 22). Springer Netherlands.
- Antilén, M., Araya, N., Briceño, M. y Escudey, M. (2006). Cambios en fracciones químicas de metales pesados en suelos chilenos modificados con lodos de depuradora afectados por un impacto térmico. Investigación del suelo, 44(6), 619-625.
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. Á., Vázquez-Alarcón, A., & Ruiz-Puga. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 19(1), 45-66.
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Cubas, P. (2010). Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos Geoquímica y Mineralogía Ambiental.
- Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E., & Ashmore, M. R (1998). Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. Chemical Speciation & Bioavailability, 10(2), 61-75.
- Sancha, A. C., Espinoza, C., & Mena, M. (2005). Criterios de Calidad de Suelos y de Aguas o Efluentes tratados para uso en riego.
- Sposito, G. (1989). The Chemistry of Soils. Oxford University Press. 277 p.
- Templeton, D. M., Ariese, F., Cornelis, R., Danielsson, L. G., Muntau, H., van Leeuwen, H. P., & Lobinski, R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches. Pure and applied chemistry, 72(8), 1453-1470.
- Valdés Durán, A., Aliaga, G., Deckart, K. et al. (2021). La línea de base geoquímica ambiental, antecedentes y fuentes de metales y metaloides presentes en suelos urbanos, periurbanos y rurales de la región de O'Higgins, Chile. Environ Geochem Health.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. In Toxicology (Vol. 192, Issues 2-3p. 95- 117).

Suelos contaminados con metales y metaloides a través del método de extracción secuencial en Graneros. Una contribución para determinar disponibilidad y movilidad de Plomo

Daniela Garrido Morales¹, Ana Valdés Durán², Mónica Antilén³

(1) Universidad de Chile, Química, Ciencias, Las Palmeras 3425, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Nueva Bilbao 12501 Las Condes, Santiago, Chile

(3) Pontificia Universidad Católica de Chile, Inorgánica, Facultad de Química y de Farmacia, Av. Vicuña Mackenna 4860 Macul, Santiago, Chile

Introducción

El suelo es un cuerpo natural y dinámico, donde encontramos en diferentes proporciones una fracción sólida equivalente a fases minerales, una fracción orgánica, gases y agua, que permiten el crecimiento de las plantas y que posee propiedades resultantes de los efectos integrados del clima y los organismos vivos que actúan sobre el material de origen, condicionados por la topografía, durante períodos de tiempo (Brady & Weil, 2013). Dentro de los factores que influyen en las propiedades del suelo se encuentra la composición química de la estructura mineralógica y su dispersión.

La concentración de metal(oid)es en el suelo, se deben a la presencia de estos en el material parental y a las diversas fuentes antropogénicas, tales como la depositación atmosférica a través de la lluvia, la aplicación de fertilizantes en el área agrícola y los derivados de la actividad minera, entre otros (Alloway, 2013). La concentración de estos elementos se puede dividir en concentración total y biodisponible (Alloway, 2013), donde la concentración total incluye todas las formas químicas en que se encuentra el elemento en el suelo; mientras que la concentración disponible incluye a especies iónicas libres, complejos solubles y formas lábiles (Rieuwerts et al., 1998).

La contaminación de los suelos por elementos traza y metales pesados es un problema ambiental grave, debido principalmente a su carácter tóxico y acumulativo. A partir de este y otros problemas ambientales a través del tiempo, surge el término de "Geoquímica Ambiental", la cual busca establecer y explicar las relaciones entre las composiciones químicas de la superficie de la Tierra y las fuentes potencialmente contaminantes. Aborda el estudio de las interacciones químicas entre la litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera, y hace relación a las acciones humanas que llevan a la degradación del ambiente (Oyarzun et al., 2010). En consecuencia, abarca temas referentes a la sostenibilidad y viabilidad de la especie humana en la tierra, vinculadas a la salud humana, animal y vegetal, conociendo los diferentes factores que condicionan la fuente de contaminación, dispersión, movilidad, distribución y concentración de los elementos y compuestos químicos en los sistemas del ciclo biogeoquímico que los afecta (Oyarzún et al., 2010).

Es de importancia saber que elementos como el As, Pb, Cd, Cr, entre otros metal(oid)es traza, pueden generar serios problemas ambientales y de salud a las personas, si es que estos se encuentran biodisponibles y móviles. Por otro lado, las distintas especies químicas en las que se puede presentar un mismo elemento poseen diferente movilidad, solubilidad y, en consecuencia, toxicidad (Templeton et al., 2000). Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son las características del suelo (pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, etc.), la naturaleza de la contaminación (origen de los metales y forma de deposición) y las condiciones medioambientales (acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad, etc.) (Solano Marín, 2008), por lo que, para el análisis de estos, es muy frecuente el empleo de métodos de extracción secuencial. Esta metodología se basa en la digestión selectiva de algunos componentes de la muestra mediante el uso de distintos reactivos, tales como agua, soluciones salinas, ácidos débiles, agentes quelantes, reductores y oxidantes (Tessier et al., 1979). Así, se simulan procesos naturales tales como la complejación, acidificación, oxidación o reducción del medio. De esta forma, se puede identificar la fracción móvil y disponible de la muestra según como se encuentre retenido el metal (Galán Huertos et al., 2008).

Dado el estudio titulado "Línea Base Geoquímica Ambiental, Background y Fuentes de Metales y Metaloides presentes en Suelos Urbanos, Periurbanos y Rurales de la Región de O'Higgins, Chile (Valdés et al., 2021) donde se identificaron áreas geoquímicamente anómalas con concentraciones de Pb (61,7 ppm) y As (134,6 ppm), entre otros, surge la necesidad de evaluar la disponibilidad y movilidad de estos metales y metaloides en el suelo a través del presente estudio.

El Pb es uno de los metales que abarca este estudio y se ubica en el grupo IVA (metales) en la tabla periódica. El Pb es un metal gris azulino que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0.002%) en la corteza terrestre. Este elemento, es generalmente obtenido de la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la cerusita (PbCO₃) (Lide, 1997), y además pertenece al grupo de elementos más comunes y tóxicos y que no son beneficiosos para la vida, incluso en concentración baja son dañinos y sus efectos son de naturaleza toxicológica y neurotoxicológica, incluyendo daño irreversible al cerebro (Chira, 2010). La concentración media mundial de Pb en suelos no contaminados es de 17 mg/kg a 27 mg/kg (Alloway, 2013). Sin embargo, contenidos superiores a 1,0 mg/kg en vegetación susceptible a la bioacumulación, pueden dar lugar a enfermedades crónicas en los animales y humanos que las consuman (Bear, 1964).

Metodología

La metodología de muestreo aplicada en este proyecto consistió en tomar 28 muestras correspondientes a las zonas anómalas de Pb identificados en el trabajo de Valdés et al. (2021). Cada una de las muestras se obtuvo de los horizontes ubicados entre los 20 y 30 cm de profundidad. Posteriormente, estas fueron tamizadas a 2 mm.

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química de Suelos de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad Católica de Chile, mediante el método de extracción secuencial, donde en cada una de ellas se pudo obtener la fracción química de los metales y metaloides medidos, en este caso el Pb. Para este método de extracción secuencial, se aplicó el protocolo propuesto por Spósito et al. (1982), con sus respectivos duplicados, utilizado en la investigación de Antilén et al. (2006). El fraccionamiento de metales pesados involucra la fracción intercambiable, absorbida, asociada a materia orgánica, carbonatada y la recalcitrante asociada a óxidos y sulfuros; obtenidas con los extractantes KNO_3 , agua desionizada, NaOH , Na_2EDTA (o más conocido como EDTA que se utiliza como agente quelante) y HNO_3 , respectivamente. A continuación se describe brevemente la metodología aplicada; muestras de 2 g, se trataron con 25 mL de los siguientes reactivos: KNO_3 0,5 mol/L durante 16 h; agua desionizada durante 2 h este paso de repite 3 veces, (los extractos se combinan generando un volumen total de 75 ml); disolución de NaOH 0,5 mol/L durante 16 h; disolución de Na_2EDTA 0,05 mol/L durante 6 h; y HNO_3 4 mol/L a 80°C durante 16 h. Después de cada extracción se centrifugó la suspensión y se filtró el sobrenadante a 0,22 micrones para luego almacenar en viales con sus respectivos códigos y en refrigeración para el posterior análisis. El contenido de los metales en cada extracto se determinó mediante espectroscopía ICP-MS a excepción de la fracción de materia orgánica del extractante NaOH , que se midió por espectroscopía ICP-OES, en los laboratorios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). Una vez obtenidos los resultados, se les realizó una validación de datos, eliminando así todos los que presentaban variables con un porcentaje de muestras con valores bajo el límite de cuantificación (<LC) mayor a un 70%, y para los elementos que poseen más del 30% de los datos con valores de concentración por sobre el límite de cuantificación, el valor de los puntos bajo el límite de cuantificación es modificado por la mitad del valor del límite de detección (Reimann et al., 2008). Los resultados obtenidos a través de las técnicas analíticas descritas fueron procesados y se presentan como gráficos y tablas.

Resultados y Discusión

Las 28 muestras se agruparon según tipo de uso de suelo en donde 9 muestras pertenecen al grupo Frutícola, 7 a Pastizal, 5 a Distinto Sitios, 4 a Maizal y 3 a Urbano. Dentro de los resultados podemos referirnos en particular del Pb como metal potencialmente contaminante. Los resultados se pueden observar en la figura 1, donde a partir de la extracción secuencial se obtuvo que, para el grupo Frutícola el 57,1% del Pb es extraído por HNO_3 , el 20,8% por NaOH , el 11,8% por Na_2EDTA y un 10,2% por KNO_3 ; para el grupo de Pastizal, el 39,7% del Pb es extraído por HNO_3 , el 26,7% por NaOH , el 16,4% por Na_2EDTA , un 11,2% por KNO_3 y un 6,0% por agua desionizada; para el grupo de Maizal el 39,6% del Pb es extraído por NaOH , el 25,7% por HNO_3 , el 21,7% por Na_2EDTA y un 12,9% por KNO_3 ; para el grupo Urbano el 61,2% del Pb total es extraído por HNO_3 , el 23% es extraído por Na_2EDTA , el 10,1% por NaOH y un 5,7% por KNO_3 y en el grupo de Distintos sitios el 51,3% de Pb extraído es por HNO_3 , el 28,8% por NaOH , el 10,6% por Na_2EDTA , y un 9,2% por KNO_3 .

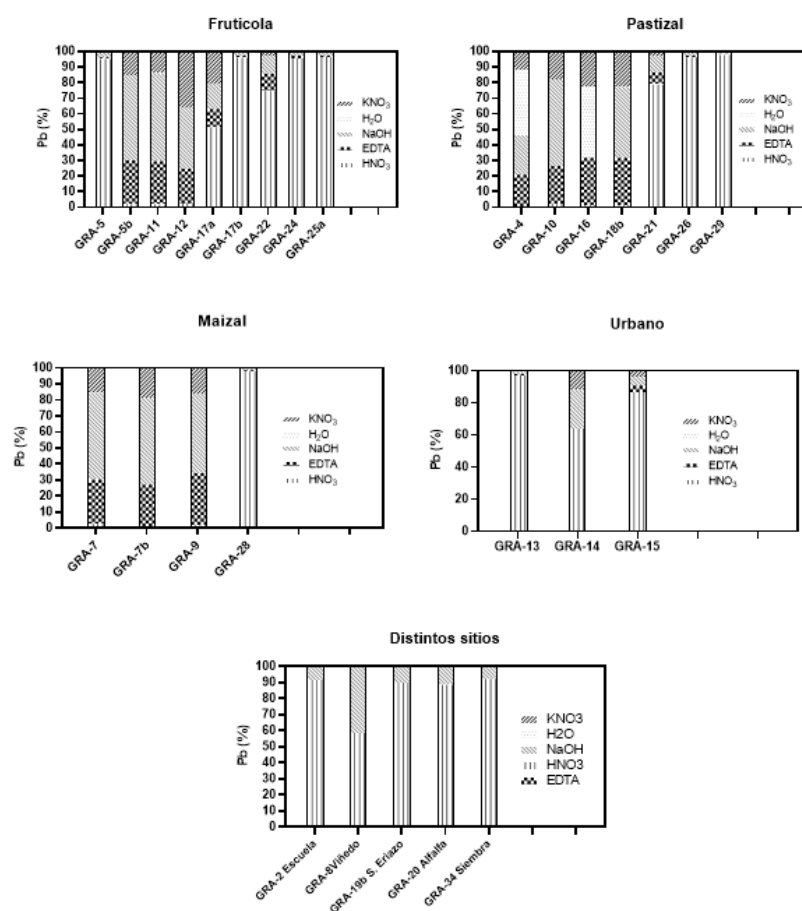


Imagen 1: Gráficos o figuras de porcentaje de concentración de los elementos analizados por extractante agrupados.

El NaOH y el HNO₃ son los dos extractantes con mayor porcentaje de concentración de Pb extraído en todos los grupos de muestras, esto quiere decir que se encuentran unido a la materia orgánica, óxidos y sulfuros de los sedimentos, lo cual en estas fracciones no estarán disponibles y es muy poco probable que se muevan. También tenemos un porcentaje relativamente bajo pero considerable de Pb entre las fracciones lábil (KNO₃ y agua desionizada) que sí podrían estar disponibles y móviles ante una lluvia y cambio de pH en el suelo. En todos los grupos tenemos entre un 6% y 12% del total de Pb en las fracciones intercambiables y adsorbidas (lábil). Para el grupo Frutícola estaríamos hablando de 137,6 mg/Kg, para el grupo Pastizal de 87,6 mg/Kg, para el grupo Maizal de 82,3 mg/kg, para el grupo Urbano de 37,1 mg/Kg y en el grupo de Distintos sitios de 45,6 mg/kg.

Sabiendo esto, se puede observar una secuencia de los extractantes debido a su abundancia de Pb en las distintas fracciones: HNO₃ > NaOH > Na₂ EDTA > KNO₃ > Agua desionizada. Además, se puede mencionar que en comparación a la normativa canadiense, el 36% de las 28 muestras presentan valores sobre lo permitido para Residencia/Parque y con respecto a la norma holandesa el 7% de las muestras sobrepasa el límite del valor de intervención (VI) donde las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas.

Palabras Clave: Extracción secuencial, metales y metaloides, movilidad, disponibilidad.

Financiamiento: Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el proyecto UC-CCHEN de la Facultad de Química y de Farmacia. Fuente de financiamiento: CONICYT + PAI/INSERCIÓN EN EL SECTOR PRODUCTIVO, SEGUNDA CONVOCATORIA 2018 Folio + (7818I20011).

Agradecimientos: Gracias al equipo de laboratorio de la Facultad de Química y Farmacia de la universidad católica de Chile, a Josefa Velásquez y Marco Acuña de CCHEN y al laboratorio de recursos tecnológicos de CCHEN.

Referencias:

- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils - Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (B. J. Alloway, Ed.; Third Edition, Vol. 22). Springer Netherlands.
- Antilén, M., Araya, N., Briceño, M. y Escudey, M. (2006). Cambios en fracciones químicas de metales pesados en suelos chilenos modificados con lodos de depuradora afectados por un impacto térmico. Investigación del suelo, 44(6), 619-625.
- Bear, F. E. (1964). Química del suelo. Ciencia del suelo, 98(1), 70.
- Brady, N. C., & Weil, R. (2013). Elements of the Nature and Properties of Soils.
- Galán H., E., & Romero B., A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, (2008, septiembre)1-13.
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Cubas, P. (2010). Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos Geoquímica y Mineralogía Ambiental.
- Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E., & Ashmore, M. R. (1998). Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. Chemical Speciation & Bioavailability, 10(2), 61-75.
- Solano Marín, A. M. (2008). Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc.
- Sposito, G. (1989). The Chemistry of Soils. Oxford University Press. 277 p.
- Templeton, D. M., Ariese, F., Cornelis, R., Danielsson, L. G., Muntau, H., van Leeuwen, H. P., & Lobinski, R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches, 72(8), 1453-1470.
- Tessier A, Campbell P, Bisson M. (1979) Sequential extraction procedure for the separation of particular trace metals. 51, 844-851.
- Valdés Durán, A., Aliaga, G., Deckart, K. et al. (2021.) La línea de base geoquímica ambiental, antecedentes y fuentes de metales y metaloides presentes en suelos urbanos, periurbanos y rurales de la región de O'Higgins, Chile. Environ Geochem Health.

Influencia geogénica y antropogénica en la signatura geoquímica y magnética de sedimentos lacustre, Laguna Inka Coya, Norte de Chile

Joseline Tapia¹⁻², Josefina Herrera¹, Pablo Pérez¹, Héctor Pizarro⁴, Adriana Aránguiz³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - CKELAR Volcanes, Antofagasta, Chile

(3) Universidad de Tarapacá, Laboratorio de Ecología Acuática, Arica, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

La Laguna Inka Coya se localiza en la Precordillera de la Región de Antofagasta a aproximadamente 2520 m s.n.m. Tiene una superficie de 500 m² y una profundidad máxima de 19 m. Entre sus principales características cabe destacar que es una laguna holomítica, oligotrófica y alcalina. La Laguna Inka Coya corresponde a una formación kárstica desarrollada durante el Cuaternario por la disolución de capas calcáreas de la Formación Chiu Chiu. Adicionalmente, esta laguna se encuentra rodeada por centros mineros, como, por ejemplo, Chuquicamata, Ministro Hales y Radomiro Tomic de CODELCO y Minera El Abra, además del relave minero de Talabre. Esta laguna es alimentada por el Río Salado, el que tiene una gran influencia de los Géisers del Tatío.

En agosto de 2021 un testigo sedimentario de 136 cm se obtuvo de la parte más profunda de la laguna, el testigo se dividió cada 0,5 cm hasta los 12 cm de profundidad y cada 1 cm hasta el final del testigo para obtener muestras de sedimentos para análisis geoquímico. Además, se tomó cada 1 cm muestras de sedimento para realizar análisis de susceptibilidad magnética. En el laboratorio, los sedimentos se secaron a 50°C y se homogeneizaron. Posteriormente fueron digeridos utilizando agua regia inversa (i.e., 4 mL HCl + 12 mL HNO₃ + 300 mg muestra) en un microondas durante 15 minutos en el Centro de Estudio del Agua en el Desierto (CEITSAZA), de la Universidad Católica del Norte (UCN). Las muestras digeridas fueron analizadas en un espectrómetro óptico (ICP-OES) en CEITSAZA. Las muestras para análisis magnéticos se analizaron utilizando un susceptibilímetro Kappabridge MFK1-FA en la Unidad de Equipamiento Científico MAINI de la UCN.

Los datos geoquímicos obtenidos fueron sujetos a control de calidad utilizando un 23% de muestras en duplicado, los valores bajo el límite de detección (LD) fueron reemplazados por el LD/2. Posteriormente se obtuvo estadística univariable, multivariable y se realizó un análisis numérico calculando los índices: de geoacumulación (Igeo), de riesgo ecológico modificado, de polución modificado y el factor de enriquecimiento (EF).

El testigo se subdividió en 3 grupos de comportamiento elemental: Grupo 1 conformado por Cu, Zn, Ni y Mo; Grupo 2 por Cr, Fe, Mn, Ti, Al y V; y Grupo 3 por As y Sb. Además, utilizando datos geoquímicos y magnéticos en el análisis de suma de raíces incremental constreñido (CONISS), el testigo se clasificó en 5 zonas (A, B, C, D y E). Los resultados preliminares de estadística bivariable y multivariable indican que de los metales estudiados, aquellos que podrían representar la meteorización de la geología de la zona serían Fe, Mn, Ti, Al, Cr, ± Zn. Los elementos Cu, Mo, Sb y As presentan correlaciones moderadas a débiles y podrían asociarse a contaminación antropogénica y/o la influencia de las aguas termales de El Tatío. Aquellos elementos que podrían representar un potencial riesgo ecológico corresponden a As y Cu. Finalmente, se recomienda realizar mayores estudios para corroborar la existencia de algún tipo de daño ecológico en este sistema lacustre.

Palabras Clave: Laguna Inca Coya, minería, Talabre, El Tatío, Antofagasta.

Financiamiento: Esta investigación es financiada por el proyecto Fondecyt Regular 1200423.

Agradecimientos: Se agradece a todo el equipo que ha colaborado con esta investigación, principalmente a Abraham Flores, María Ildefonso, Víctor Pinilla.

Referencias:

- Aránguiz, A. et al. Aquatic community structure as sentinel of recent environmental changes unraveled from lake sedimentary records from the Atacama Desert, Chile. Plos One <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229453>.
- Romero et al. 2003. Arsenic enrichment in waters and sediments of the Río Loa (Second Region, Chile). Applied Geochemistry. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00059-3).

La Geología al servicio de la búsqueda y hallazgo de cuerpos de detenidos desaparecidos en el Fuerte Arteaga, Comuna Colina: Una contribución a la memoria a 50 años del Golpe Militar de 1973

Sergio Iriarte Díaz¹

(1) ICA Geoconsultores (exfuncionario Servicio Nacional de Geología y Minería)

Introducción

En el año 2001, como consecuencia de la información entregada por las Fuerzas Armadas a la “Mesa de Diálogo”, la Ministra de la Corte de Apelaciones Doña Amanda Valdovinos, solicita colaboración a distintas instituciones públicas para conformar un equipo multidisciplinario de profesionales para realizar prospecciones, sondeos y excavaciones arqueológicas en la búsqueda de cuerpos de detenidos desaparecidos al interior y en las inmediaciones del Fuerte Arteaga, o como es conocido hoy, Brigada de Operaciones Especiales Lautaro en la Comuna de Colina.

El equipo de prospección y búsqueda convocado por la Ministra Valdovinos estuvo conformado por arqueólogos, botánicos y geólogos, estos últimos funcionarios del Servicio Nacional de Geología y Minería.

A partir de la información entregada por las Fuerzas Armadas y la investigación realizada por la Brigada Investigadora de Delitos Contra los Derechos Humanos (Bridehu) de Investigaciones de Chile, el poder judicial logra constituir en el sitio al equipo, dando inicio al trabajo de prospección y búsqueda. Este da como resultado la identificación de dos sitios arqueológicos que, posteriormente dieron lugar al reconocimiento de al menos 12 víctimas de desaparición forzada.

Objetivos

El objetivo del presente trabajo es dejar un testimonio histórico respecto de las actividades de prospección realizadas por el equipo de geólogos que participamos en los hallazgos de este sitio de memoria en la comuna de Colina. También un testimonio metodológico de uno de los primeros registros de lo que hoy es conocida como la Geología Forense.

Metodologías

La búsqueda imponía complicaciones relativas a lo errático de los relatos de testigos y a los cambios que habían tenido los sitios por el paso del tiempo (casi 30 años), esto producía una disimilitud entre los relatos de los testigos y el estado actual del sitio. Para resolver estas dificultades la Ministra Valdovinos conformó un equipo científico y técnico para llevar a cabo una investigación conjunta con profesionales y científicos de distintas áreas, lo cual fue una propuesta metodológica innovadora para ese entonces.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo geológico se centró en interpretar los relatos de los testigos, valiéndose de técnicas tales como análisis de fotografías aéreas, interpretación en terreno de los relatos de testigos y la identificación de rasgos geomorfológicos y estratigráficos que permitieran ubicar en terreno los sitios de inhumación.

El trabajo realizado se desarrolló de acuerdo con las siguientes etapas:

- Etapa de investigación Preliminar:
 - Análisis de testimonio de testigos
 - Selección e inspección de los sitios de búsqueda (búsqueda amplia)
 - Selección de métodos de trabajo y criterios de exploración (Reconocimiento, fotográfico, análisis morfológico, litológico y de uso de suelo)
 - Selección de los sitios a explorar y delimitación en terreno
- Etapa de exploración:
 - Exploración preliminar de los sitios delimitados en la etapa anterior
 - Aplicación de métodos y criterios de exploración (análisis geomorfológicos y sedimentológicos)
- Etapa de exhumación y de apoyo en la clasificación de material hallado.

Resultados

En enero de 2001 la Corte Suprema designa a la Ministra Amanda Valdovinos para verificar datos entregados por la Mesa de Diálogo, referidos a la existencia de restos de detenidos desaparecidos en el Fuerte Arteaga, en la comuna de Colina. A partir de los testimonios de testigos, en su mayoría civiles que realizaban su Servicio Militar Obligatorio y de otras fuentes aportadas por las indagaciones realizadas por familiares de detenidos desaparecidos, se logró establecer que algunos de los prisioneros que pudieran haber sido ejecutados e inhumados en el Fuerte Arteaga corresponderían a los detenidos de la Moneda el mismo día del Golpe Militar de 1973.

Luego de un análisis exhaustivo de sitios recurrentes en los testimonios colectados por la PDI, se establecen al menos tres sectores o áreas de búsqueda. La primera, tenía relación con antiguas labores mineras en las inmediaciones del fuerte, principalmente en el sector de Peldehue; la segunda, en informaciones de ajusticiamientos en el sector de Quebrada Los Ratones y finalmente, en el mismo Fuerte Arteaga, en una fosa común localizada el límite noroeste del recinto militar.

Uno de los testimonios que llegaron a manos de la Ministra fue una nota que decía "A 5 km del recinto de campaña frente al sector cordillerano NASA, en una caverna 20 cráneos, verano 1975" (Jimeno y Mohor, 2022). Sobre esta base se realizó la búsqueda en lo que podrían corresponder a estas "cavernas", explorando al menos 4 labores mineras abandonadas, sin embargo, no hubo resultados positivos toda vez que la mayoría presentaban derrumbes y/o problemas de seguridad por inestabilidad de las labores.

Para los otros dos sectores, se realizó una investigación previa en base a las declaraciones de testigos y se obtuvieron de parte del Instituto Geográfico Militar fotografías aéreas del sector lo más próximas y anteriores al 1973. Se logró contar con fotografías de un vuelo de 1960 aproximadamente. Estas fotografías permitieron reconocer las instalaciones del Fuerte en una disposición similar a la que tenían para la fecha del Golpe. Además, se seleccionaron fotografías recientes que nos permitieran tener referencias de los cambios ocurridos. Dada la experiencia del trabajo geológico con fotografías aéreas, se nos encomendó realizar un análisis de los cambios acaecidos en el sector, tales como tala de vegetación nativa, existencia de caminos, movimientos de tierra, instalaciones militares (galpones), etc., y de esa manera ayudar al reconocimiento en terreno de lo relatado por los testigos. Con la ayuda de expertos botánicos, se logró dilucidar qué especies de árboles y/o arbustos podrían corresponder a especies nuevas (< 20 años) respecto de las que habían perdurado en el tiempo, de manera de establecer qué sitios estaban libres de vegetación para esa época.

En el sector de quebrada Los Ratones (Figura 1), se utilizó la metodología de acotar el área de búsqueda a lo expresado en los testimonios, pero además dar cuenta de los caminos existentes a 1973, la vegetación que existía antes de dicho año y la que pudiera haber sido removida o aquella que pudiera haber crecido con posterioridad. Aquí, el trabajo experto del profesional botánico fue clave en reconocer la edad de los árboles y arbustos existentes al momento de la exploración. La otra guía de exploración fue dada por personal del Cementerio General que había sido contratado por la Ministra Valdovinos para colaborar con su experiencia en tumbas y fosas comunes, esta guía daba cuenta de la morfología superficial de los sitios de inhumación los que debido a la descomposición de las partes blandas de los cuerpos y a la compactación natural del terreno producto de las lluvias, producirían hendiduras en terreno con la forma de la excavación original. Por lo tanto, la exploración se centró en los sitios identificados por los testigos, en referencias geográficas que ellos indicaron (caminos, árboles, etc.), en sectores que habían tenido cambios tales como tala de árboles, nuevos caminos o vegetación relativamente nueva.



Luego de una intensa búsqueda de morfologías superficiales que indicasen posibles sitios de inhumación, se realiza el hallazgo de una primera fosa clandestina que contenía un cuerpo esquelético de un hombre en una excavación a no más de 80 cm de profundidad (Carrasco et al., 2001). Luego, gracias al trabajo de los arqueólogos y las investigaciones posteriores, se estableció que se trataba de un dirigente del Partido Comunista capturado por la Dirección de Inteligencia Nacional (DINA) en 1976, identificado como Juan Luis Rivera Matus (Carrasco et al., 2001; Cáceres, 2011). Pocos meses antes de su hallazgo, este dirigente aparecería en un listado entregado por el Ejército a la Mesa de Diálogo en el cual se establecía que él habría sido arrojado al mar, en lo que se conocería posteriormente como la operación "Retiro de Televisores".

El tercer sitio, corresponde a uno ubicado en los márgenes de las instalaciones del Fuerte Arteaga en dicha época, este sitio surge a partir del relato de los testigos, quienes establecían que, en dicho lugar, varios detenidos habían sido fusilados, los cuerpos de las víctimas habrían sido arrojados al interior de una noria (Cáceres, 2011). Los relatos fueron contrastados con la inspección de fotografías aéreas de alta calidad y analizadas por el equipo de geólogos. Esta actividad permitió identificar sitios descritos por los testigos y que al momento de la exploración se encontraban, en su mayoría, completamente cambiados debido a las modificaciones realizadas en el Fuerte con el paso de los años. La identificación en las fotos aéreas de caminos principales, alamedas, galpones, sitios de almacenamiento de tanques, desviaciones de los caminos, etc., ayudaron a delimitar el sector más probable para la existencia de la noria mencionada. Ya con un sector más acotado, se inició una búsqueda de indicios morfológicos que dieran cuenta de antiguas excavaciones, tales como hendiduras en el terreno, árboles nuevos, interrupciones en el terreno.

Luego de unos días de exploraciones se encuentra un sector con una leve depresión topográfica de forma circular de más de 5 m de radio. Con la ayuda de una retroexcavadora y excavaciones manuales, bajo la supervisión del equipo de geólogos, se identifican, en los márgenes del área deprimida, modificaciones en la estratigrafía natural del terreno. Conforme las excavaciones avanzaban y se delimitaba el área disturbada, se empieza a encontrar materiales antrópico, tales como envases de plástico, botellas, cajetillas de cigarro, etc. El material extraído fue harneado y analizado por los arqueólogos, resultando en el hallazgo de más de 500 fragmentos óseos (Cáceres, 2011), principalmente fragmentos pequeños como dientes y falanges. El análisis posterior de estos fragmentos permitió el reconocimiento de 11 detenidos tomados por las fuerzas militares en el palacio de la Moneda, los cuales pertenecían al círculo más cercano del presidente Salvador Allende y que permanecieron junto a él hasta el momento de su muerte. Algunos de los últimos reconocimientos se realizaron con técnicas más modernas en 2011, logrando la identificación de al menos uno más de los 23 detenidos de la Moneda (Jimeno y Mohor, 2022).

Conclusiones

A partir del trabajo multidisciplinario realizado por el equipo de arqueólogos, botánicos, ingenieros y geólogos que participamos de esta investigación se logra, mediante un trabajo sistemático e integral, que incluyó, en nuestro caso, técnicas básicas de geología de campo, tales como análisis de fotografías aéreas, morfológicos y estratigráficos, entrevistas a testigos y lecturas de sus declaraciones, reconocimiento de sitios y refinamiento de la búsqueda, encontrar al menos a doce detenidos desaparecidos del Golpe Militar de 1973 y sus restos ser devueltos a sus familias. La tenacidad y valentía de la Ministra Amanda Valdovinos permitió que estas 12 familias pudieran encontrar algo de paz.

En este rescate de uno de los momentos más nefastos de nuestra historia es importante recordar que, como geólogos, estamos inmersos en la sociedad y que nuestro aporte puede ser importante. Invitar además a los colegas a participar de las iniciativas que se están impulsando para investigar más sitios de memoria y aplicar los nuevos conocimientos que la Geología Forense entrega.

Este es un pequeño homenaje a mi suegro Jaime Enrique Vásquez (detenido desaparecido y aún no encontrado), a Tania mi compañera de vida y madre de nuestras cuatro hermosas hijas y a mi suegra Carmen Sáenz que fue compañera de trabajo de varias generaciones de geólogos.

Palabras Clave: Geología, Forense, Detenido, Desaparecido, Fuerte Arteaga.

Agradecimientos: A mi hija Casandra, hoy Arqueóloga, por ayudarme a recomponer esta historia y ponerme en contacto con su profesor Carlos Cáceres quien fuera parte del equipo del Fuerte Arteaga en el 2001.

Referencias:

- Carrasco, C.; Cáceres, I., Jensen, K. y Berenguer, J. 2001. Excavaciones Arqueológicas en el Fuerte Arteaga, Comuna de Colina, Región Metropolitana: Exhumación de un caso de Detenido Desaparecido.
- Cáceres, I. 2011. Detenidos Desaparecidos en Chile: Arqueología de la muerte negada. Memoria para optar al título de arqueólogo. Departamento de Antropología de la Universidad de Chile.
- Jimeno, C. y Mohor, D. 2022. La Búsqueda. Editorial Planeta.

Tendencias históricas de los niveles de concentración de arsénico en material particulado respirable en la ciudad de Calama

Manuel Leiva-Guzmán¹, Ana Valdés Durán², Richard Toro Araya¹, Luis Felipe Sánchez Puentes¹, Tomás Claramunt Ancavil¹, Luis Navarro Frez¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Las Palmeras 3425, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, División de Investigación, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, Nueva Bilbao 12501, Santiago, Chile

Desde principios del siglo pasado, Chile ha sustentado su economía en la actividad minera, caracterizada por la presencia de pórfidos de cobre-molibdeno y oro epitermal ubicados principalmente en el centro y norte del país (Oyarzún et al., 2016). El material particulado (MP) atmosférico, es una mezcla compleja de sustancias que varían en tamaño, composición química, formación, origen y concentración, y son variables en el espacio y el tiempo. Las partículas pueden incluir una amplia gama de especies químicas, desde metales hasta compuestos orgánicos e inorgánicos (Tsai y Cheng, 2004; Park y Kim, 2005). Entre los compuestos inorgánicos, destacan los metales traza, que son emitidos por diversas fuentes naturales y antropogénicas, como los materiales de la corteza terrestre, el polvo de las carreteras, las actividades de construcción, los vehículos de motor la combustión de carbón y petróleo, la incineración y otras actividades industriales (Watson et al., 2002; Quiterio et al., 2004; Arditoglou y Samara 2005; Shah y Shaheen).

El arsénico (As) es un tipo de metaloide que a menudo cae en la categoría de metales pesados debido a las similitudes en las propiedades químicas y el comportamiento ambiental (Yu et al., 2017). Las operaciones mineras suponen un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente, ya que estas fuentes están muy extendidas a nivel mundial, generan grandes cantidades de partículas de forma casi continua y tienen un alto potencial de contener contaminantes tóxicos asociados a las emisiones (Chakradhar, 2004; Neuman et al., 2009; Brotons et al., 2010; Csavina et al., 2011).

Este trabajo presenta el análisis de los registros históricos de las concentraciones de arsénico unido al MP10 en siete estaciones de monitoreo ubicadas en la ciudad de Calama y los alrededores de las operaciones mineras de la División Chuquicamata entre los años 2016 y 2022 con el fin de establecer la evolución temporal de las concentraciones de metales pesados en el MP.

De las siete estaciones analizadas de la División Chuquicamata, las estaciones Complejo Deportivo 23 de Marzo y Escuela Pedro Vergara Keller presentan concentraciones más altas de As mostrando un promedio anual que supera los lineamientos internacionales de la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea. Los valores máximos de todos los años analizados se observaron entre los años 2016 y 2018. El análisis de tendencias históricas de los niveles de concentración media de As empleando el estimador de tendencias TheilSen mostró una disminución estadísticamente significativa de las concentraciones de As para la mayoría de los sitios de muestreo en estudio. Las reducciones de la concentración media de As estadísticamente significativas con un nivel de confianza de al menos el 95% se encuentran en el rango de -7,71 a -31,6 % año⁻¹ en el período 2016-2021.

El análisis de la distribución anual de las concentraciones de As mostró que la media anual siempre es mayor a la mediana anual. La diferencia entre la mediana y la media anual se explica por los valores del Límite Superior y los valores extremos, indicando la ocurrencia de eventos agudos de concentración de As que incrementan las concentraciones anuales y explican la diferencia entre la mediana y la media. El estudio en profundidad de los eventos que incrementan las concentraciones anuales permitiría orientar las gestiones tendientes a disminuir las concentraciones anuales en la zona de estudio.

Palabras Clave: Contaminación Atmosférica, Arsénico, Material Particulado, Tendencias Históricas

Financiamiento: Fortalecimiento de capacidades para la caracterización de multi-metales en aerosoles atmosféricos en tiempo real: red de investigación interdisciplinaria por un aire limpio. Concurso de Equipamiento Científico FONDEQUIP EQM190045. Estudio Arsénico 2022 CODELCO: Concentraciones en tiempo real, dinámica atmosférica y contribución de fuentes.

Agradecimientos: Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

Referencias:

- Oyarzún, J., Oyarzún, R., Lillo, J., Higuera P., Maturana, H., Oyarzún, R. (2016). Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings deposits in northern central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 69, 25-42. doi:10.1016/j.jsames.2016.03.004.
- Arditsoglou, A. and Samara, C. (2005). Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study. *Chemosphere*, 59: 669-678.
- Brotons JM, Diaz AR, Sarria FA, Serrato FB. (2010). Wind erosion on mining waste in southeast Spain. *Land Degrad Dev.*, 21: 196-209.
- Chakradhar B. (2004). Fugitive dust emissions from mining areas. *J Environ Sys.* 31:279-288.
- Csavina J, Landázuri A, Wonaschütz A, Rine K, Rheinheimer P, Barbaris B, et al. (2011). Metal and Metalloid Contaminants in Atmospheric Aerosols from Mining Operations. *Water Air Soil Pollut.* 221: 145-57.
- Neuman CM, Boulton JW, Sanderson S. (2009). Wind tunnel simulation of environmental controls on fugitive dust emissions from mine tailings. *Atmos Environ.* 43:520-529.
- Park and Kim (2005). Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere. *Chemosphere*, 59:217-226.
- Quiterio et al., (2004). Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period. *Atmospheric Environment*, 38: 321-331.
- Shah and Shaheen, (2010). Seasonal behaviours in elemental composition of atmospheric aerosols collected in Islamabad, Pakistan. *Atmospheric Research*, 9: 210-223.
- Tsai and Cheng, (2004) Characterization of chemical species in atmospheric aerosols in a metropolitan basin. *Chemosphere*, 54: 1171-1181.
- Watson et al., (2002.) Receptor modeling application framework for particle source apportionment. *Chemosphere*, 49 (2002), pp. 1093-1136.
- Yu R., L. He, R. Cai, B. Li, Z. Li, K. Yang (2017). Heavy metal pollution and health risk in China, *Global Health Journal*, 1, 47-55.

Impacto antrópico en aguas superficiales de la cuenca del río Loa, Región de Antofagasta

Luis Felipe Liberona Salinas¹, Camilo Sánchez Yañez¹⁻², Álvaro Navarrete¹⁻²

(1) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Avda. Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Cobrizo, Geología Ambiental, Casa Matriz Linares, Región del Maule, Chile

En la región de Antofagasta se han reportado grandes concentraciones de metales pesados y metaloides en los suelos, rocas e incluso en muestras de polvo urbano (Tapia 2018, Sepúlveda 2020), las cuales se han asociado a fuentes naturales como campos geotermales, franjas metalogénicas existentes y las condiciones climáticas áridas, sin embargo, también se han asociado diversas fuentes antrópicas como las industrias mineras (Siegel, 2002) y la industria agrícola.

Las condiciones áridas de la región de Antofagasta hacen del recurso hídrico extremadamente escaso para la población, siendo el Río Loa el recurso más importante de la región, en el cual estudios anteriores han señalado enriquecimientos anómalos de metales pesados y metaloides en el cauce del río, de los cuales se destaca el Arsénico (Romero, 2003), siendo este último uno de los más dañinos para la salud. Se ha corroborado el comportamiento del As y otros elementos a lo largo de los años usando datos de dominio público (DGA), donde se elaboró una base de datos geoquímica desde 1950 al 2020 con las concentraciones químicas de diversos elementos donde se destacan enriquecimientos en As, Cu y Pb como los más altos de los elementos asociados a la industria minera (Siegel, 2002) con valores medios de 0,8 mg/L, 0,03 mg/L y 0,02 mg/L respectivamente, superando el estándar propuesto por la NCh 409 para agua potable (0,001 mg/L para As) y la NCh 1333 para regadíos en el caso del As y Cu (0,01 mg/L y 0,02 mg/L respectivamente). Análisis de los últimos 20 años muestran una tendencia al aumento de los valores de As, con valores medios desde 0,07 mg/L para el año 1995, 1,04 mg/L para el año 2000 y 1,34 mg/L para el año 2019, y una variabilidad de datos alta con valores de desviación estándar entre 0,88 mg/L para 1995 y 2,06 mg/L para el año 2019. Una línea de tendencia calculada a partir de los datos de As disponible desde 1967 hasta 2020 demuestra un aumento progresivo de las concentraciones, obteniendo una pendiente de 0,286. Haciendo uso de los mismos datos e incorporando la región de Tarapacá se realizó una línea de base geoquímica para el As, la que se consideró como background para determinar influencias antrópicas mediante el Índice de Geoacumulación (Igeo), obteniendo valores máximos que van desde levemente contaminado a moderadamente contaminado.

La distribución geográfica de las muestras analizadas muestra que los valores más altos de As provienen principalmente del Río Salado, tributario ubicado al este de Calama, al cual estudios anteriores han asociado enriquecimientos naturales de As y B por influencias del campo geotérmico El Tatio ubicado en la naciente de este río (Romero, 2003; Tapia 2018). Sin embargo, existen enriquecimientos anómalos en el río San Salvador ubicado en la zona oeste de Calama, donde además de enriquecimiento natural originado por la franja metalogénica del Eoceno-Oligoceno no se puede descartar la influencia antrópica tanto de la polución de la ciudad de Calama, de la industria minera y agrícola cercanos a ésta, donde estudios con condiciones similares (Bhattacharya, et al., 2012) han demostrado que ésta última puede ser un factor de removilización importante para el arsénico.

Palabras Clave: Arsénico, Geoquímica de Aguas, Impacto Antrópico.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración del laboratorio del Centro de Nanotecnología Aplicada (CNAP) de la Universidad Mayor por el uso de su Instrumental de Microscopía electrónica de barrido.

Evaluación de la variación climática norte-sur en Chile: utilización del índice Sc/Al en sedimentos fluviales

Juan Pablo Lacassie Reyes¹, Rafael Mardones Parada¹, Paula Castillo Gonzalez²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología General, Av. Santa María 0104, Santiago, Chile

(2) Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie, Münster, Münster, Alemania

Los sistemas fluviales de Chile, distribuidos a lo largo de todo su territorio, abarcan un amplio espectro climático desde condiciones de hiperaridez en el norte, a un clima frío estepárico en el extremo sur. Tal es el caso de los sistemas fluviales de los ríos Lluta, Copiapó, Limarí, Valdivia y Aysén, cuyas líneas de base geoquímicas y mineralógicas ha sido parte recientes estudios realizados por el Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN (Baeza *et al.*, 2014; Barrera *et al.*, 2017; Espinoza *et al.*, 2020; Lacassie *et al.*, 2019; Lacassie *et al.*, 2022; Roth *et al.*, 2015). Estos estudios revelan que la composición química de estos sedimentos fluviales refleja la influencia de factores naturales y antrópicos. Entre los factores naturales destaca la composición litológica del área fuente. Sin embargo, la influencia del clima en la química de estos sedimentos no ha sido considerada, salvo en el caso del sistema fluvial del río Aysén, donde sólo se evalúa a nivel de cuenca (e.g. Roth, 2006; Barrera *et al.*, 2017).

Por este motivo, en este trabajo evaluamos la influencia del factor climático, en la composición química de los sedimentos de los 5 sistemas fluviales indicados. Lo anterior, bajo la hipótesis de que la variabilidad climática presente en el tramo territorial comprendido por estos 5 sistemas fluviales, debiese verse reflejada en la composición química de sus respectivos sedimentos.

La información geoquímica evaluada comprende entre 59 y 61 elementos y compuestos químicos (ICP-ES e ICP-MS), para un total de 1493 muestras de sedimentos activos de los sistemas fluviales los ríos Lluta (89 muestras), Copiapó (577 muestras), Limarí (332 muestras), Valdivia (261 muestras) y Aysén (234 muestras).

Los resultados muestran una correlación positiva entre la variabilidad climática y la composición química de los sedimentos fluviales estudiados. En particular, se observa un fuerte acoplamiento entre la variación norte-sur de las precipitaciones anuales medias y los valores de la razón Sc/Al en los sedimentos. Se estima que dicha correlación refleja las siguientes características y procesos: 1) la tendencia del Sc, cuyo estado de oxidación es (+3), a acumularse en minerales ferromagnesianos sustituyendo al Fe³⁺ (e.g. en piroxenos ricos en Fe); 2) la concentración de minerales ferromagnesianos en suelos residuales producto de meteorización química; 3) el aumento en la intensidad de la meteorización química en climas húmedos (e.g. lateritas) y 4) la fuerte variabilidad climática en sentido norte-sur, en el tramo comprendido por las 5 cuencas estudiadas, siendo esta una característica única del territorio chileno. Cabe indicar que, por sí mismos, los valores de Sc no dan cuenta de la variabilidad indicada. Sin embargo, esta si se verifica luego de normalizar los valores, utilizando las concentraciones de aluminio (Al), lo que comúnmente se considera como la mejor aproximación geoquímica para minimizar los efectos asociados al tamaño de grano de los sedimentos (e.g. Ho *et al.*, 2012).

Dado que los datos geoquímicos de las 5 cuencas evaluadas fueron levantados utilizando las mismas metodologías de muestreo y análisis, se considera que los resultados obtenidos avalan el uso del índice Sc/Al en otro tipo de estudios asociados a variación climática en sedimentos. En particular, se estima que la razón Sc/Al, podría ser utilizada para inferir condiciones climáticas pasadas en estos y otros sistemas fluviales. Lo anterior, a través de una comparación entre los valores de este índice para sedimentos actuales, respecto de los sedimentos pre-industriales que usualmente conforman las terrazas fluvio-aluviales de los sistemas modernos.

Palabras Clave: cambio climático, sistemas fluviales, meteorización, sedimentos, meteorización.

Financiamiento: Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Agradecimientos: Esta contribución fue patrocinada por la Subdirección Nacional de Geología en el marco del desarrollo del Plan Nacional de Geología del SERNAGEOMIN.

Referencias:

- Baeza, L., Lacassie, J.P., Astudillo, F., Carrasco, F., Castillo, P., Espinoza, F., Figueroa, M., Miralles, C., Muñoz, N., Ramírez, C., 2014. Geoquímica de sedimentos de drenaje de la Hoja Arica, Región de Arica y Parinacota. SERNAGEOMIN.
- Barrera, J., Roth, T., Lacassie, J.P., 2017. Línea base geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén, XI Región de Aysén, Chile. SERNAGEOMIN. Informe Registrado IR-17-67: 126 p., 1 CD con anexos. Santiago.
- Espinoza, F., Lacassie, J.P., Astudillo, F., Baeza, L., Castillo, P., Muñoz, N., Ramírez, C., Carrasco, F., Miralles, C., 2020. Geoquímica de sedimentos de drenaje de la Hoja La Serena, Región de Coquimbo. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica.
- Ho, H.H., Swennen, R., Cappuyns, V., Vassilieva, E., Van Tran, T., 2012. Necessity of normalization to aluminum to assess the contamination by heavy metals and arsenic in sediments near Haiphong Harbor, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences* 56 (2012) 229–239.
- Lacassie J.P., Carrasco F., Baeza, L., 2019. Impacto de las remociones en masa de marzo de 2015 en el sistema fluvial del Río Copiapó, Región de Atacama: análisis comparativo de la geoquímica de sedimentos [monografías]. Santiago: SERNAGEOMIN, 2019. 84 p.: il. (Informe Registrado: n.77).
- Lacassie, J.P., Astudillo, F., Mardones, R., Oliva, P., Castro, R., Quiral, V., Plaza, F., 2022. SERNAGEOMIN. Geoquímica y mineralogía de sedimentos fluviales de la cuenca del río Valdivia, regiones de La Araucanía y de Los Ríos, Chile [monografías]. Santiago: SERNAGEOMIN, 2022. 108 p.: il. (Informe Registrado IR-22-102).
- Roth, T., Barrera J., Lacassie, J.P., 2015. Geoquímica de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén: Influencia de factores antrópicos y naturales. [artículos de congresos]. 2015. Publicado en: Congreso Geológico Chileno, 14, La Serena, Chile, 4 - 8 octubre 2015, pp.310-313 (v.3).

Cuantificación del efecto erosivo en relaves mineros abandonados y sus implicancias en el medio ambiente. Caso de estudio: Relave abandonado Las Palmas, Región del Maule

Ringo Maturana Miranda¹, Álvaro Navarrete Calvo¹, Camilo Sánchez Yáñez¹⁻², Idania Briceños De Urbaneja³, Alex Garcés Catalán⁴

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Manuel Montt, 367, Providencia., Santiago, Chile

(2) Cobrizo- Geología Ambiental, Casa Matriz, Linares, Chile

(3) Universidad Mayor, Hémera Centro de Observación de la tierra, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago 8580745, Chile

(4) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Ciencias Físicas y Matemáticas, Tupper 2007, 2007 Edificio, 8370451 AMTC, Santiago, Región Metropolitana, Chile

En Chile, existen un total de 764 depósitos de relaves publicados, de los cuales 110 corresponden a depósitos activos, 473 a inactivos y 173 abandonados (SERNAGEOMIN, 2022). Estos se distribuyen en todo el territorio nacional, incluso cercano a centros poblados. Si bien, hoy en día existe un monitoreo de los relaves, los datos cuantificables de volumen y material erosionado son escasos hasta la fecha. Por este motivo surge la necesidad de estimar la cantidad de material removido de los relaves abandonados, y dilucidar cómo estos metales potencialmente tóxicos quedan disponibles en el medioambiente.

Dentro de los impactos que se pueden generar a partir de los relaves abandonados, cuando no emplean una infraestructura adecuada para su conservación en el tiempo, es la contaminación por metales y metaloides, además de acidificación por acumulación de sulfuros, produciendo en algunas ocasiones drenaje ácido. Estos contaminantes pueden ser liberados al medio ambiente, dispersándose por diferentes medios, por ejemplo: aire, agua y sedimentos, en este sentido, su destino dependerá de varios factores, tales como el comportamiento del elemento químico, del comportamiento geoquímico o de la granulometría del mineral que contiene el relave, así como también de las condiciones geomorfológicas, climáticas e hidrológicas donde se emplaza. Uno de los principales desafíos sigue siendo el enfoque cuantitativo, que puede aportar para la evaluación ingenieril, medidas de control o mitigación. Nos referimos a datos que puedan contestar las interrogantes de los distintos actores involucrados en torno a relaves abandonados, como, ¿cuán contaminado está el entorno?, así como, ¿cuánto volumen ha perdido el relave? Este estudio quiere centrarse en responder el segundo tipo, asociado a la erosión. De esta forma, se propone el estudio sobre el volumen perdido y la tasa de erosión del relave abandonado Las Palmas, en la comuna de Penciahue, región del Maule. La construcción de este relave perduró desde el año 1981 hasta 1998, el cual finalmente fue abandonado a partir del cierre de la mina en 1999. Posteriormente, tras el terremoto del año 2010, ocurre un colapso del relave, esparciendo 12,5(ha) de sedimentos produciendo daños en los principales flujos de agua, como el estero Las Palmas y Los Ladrones (CENMA, 2017).

Para abordar esta problemática, se propuso el uso de un dron (Phantom 4 + RKT2) para cuantificar el volumen y tasa de erosión. Así, sería posible obtener información rápida y eficaz en alta resolución, capaz de generar modelos 3D, a un costo relativamente bajo. Este método ha sido utilizado en otros lugares del mundo, por ejemplo: para el cálculo del volumen y tasa de erosión (Ha/año) en relaves abandonados y monitoreo de hundimiento de relaves mineros (Peña-Ortega, 2019), entre otros. A pesar del potencial de esta herramienta, efectividad y bajo costo, el uso de drones aplicado a problemas ambientales y evaluación de riesgos es bajo. Por este motivo se empleará este método para abordar esta problemática y proyectarla a nivel nacional, con el fin de llevar un monitoreo a cualquier escala, utilizando las ventajas comparativas de esta técnica que, si bien no es taxativa, permite tener una estimación de los volúmenes perdidos-erosionados.

En particular, el cálculo de volumen se realizará mediante software ArcMap 10.5, el cual contempla la generación de dos modelos de elevación (DEM), uno a partir de las condiciones actuales del relave (DEM1) y el otro con las elevaciones hipotéticas iniciales (DEM0). Este último, consiste en restringir y delimitar las elevaciones previas a los procesos de erosión, las cuales se determinan en base a observaciones de campo, como indicadores asociados a estructuras presentes en relaves (cárcavas, redes de drenaje, laminaciones, ondulitas). Finalmente, la diferencia volumétrica entre cada una de las superficies simuladas estimaría un total de material removido (Padró, J.C, 2022). Así mismo, para el cálculo de la tasa de erosión se considera el año de abandono del relave, el tonelaje y el área superficial, el cual nos va a brindar una aproximación del material erosionado por año.

Por último, contaremos con el levantamiento de datos de terreno los días 28 y 29 de agosto del 2023. La metodología además será aplicada en otro relave inactivo (La Africana) en la localidad de Santiago, con el objetivo de evaluar dicho método y comprender cuánto afectan los factores erosivos en distintas regiones. Así, este estudio busca cuantificar el volumen removido, en conjunto con antecedentes geoquímicos y mineralógicos, para entender cómo es la interacción entre los residuos y el medio ambiente, además de colaborar con aquellos organismos involucrados en el desarrollo de políticas ambientales y tomadores de decisiones.

Palabras Clave: Relaves, Erosión, Drone, Metales y metaloides.

Agradecimientos: Se agradece a Waldo Pérez director del Centro de Observación de la Tierra “Hémera”, por facilitar las instalaciones para el procesamiento de los vuelos con dron.

Referencias:

- Peña-Ortega, M., Del Río-Salas, R., Valencia-Sauceda, J., Mendivil-Quijada, H., Minjarez-Osorio, C., Molina-Freaner & Moreno-Rodríguez, V. (2019). Environmental assessment and historic erosion calculation of abandoned mine tailings from a semi-arid zone of northwestern Mexico: insights from geochemistry and unmanned aerial vehicles. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Duque, J. M., Zapico, I., Oyarzun, R., García, J. L., & Cubas, P. (2015). A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain. *Geomorphology*.
- Hämmerle, M., Schütt, F., & Höfle, B. (2016). Terrestrial and unmanned aerial system imagery for deriving photogrammetric three-dimensional point clouds and volume models of mass wasting sites. *Journal of Applied Remote Sensing*.

- Padró, J. C., Cardozo, J., Montero, P., Ruiz-Carulla, R., Alcañiz, J. M., Serra, D., & Carabassa, V. (2022). Drone-based identification of erosive processes in open-pit mining restored areas.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Williams, R. (2012). DEM de diferencia. *Técnicas Geomorfológicas*. Pizarro, G., Pasten, P., & Bonilla, C. (2010). Evaluación preliminar de contingencia en tranque de relaves Las Palmas, sector Penciahue, Región del Maule: Fase I. Informe final.
- Muñoz, F. (2023) Principales procesos geoquímicos asociados al relave abandonado Las Palmas, Comuna de Penciahue, Región del Maule (35°S / 71°W) [Memoria de pregrado para optar al título de geólogo.] Repositorio Universidad Andres Bello.

Impacto de la actividad minera en la desembocadura del río Salado posterior a los eventos aluvionales del año 2015: Efectos en las aguas superficiales, subterráneas y marinas

Cristóbal Ignacio Méndez Morgado¹, Javiera Valentina Valderrama Arellano¹, Tamara Francesca Rabi Misle¹,
Valeria Alejandra Reinoso González¹

(1) Hídrica Consultores SpA, Génova 2015 11 Piso 1, Providencia

Los ambientes costeros se caracterizan por la intervención de diversos actores, tanto naturales como antrópicos, y por su vulnerabilidad a los cambios que pueden producirse tanto externa como internamente. La desembocadura del río Salado en la playa de Chañaral no es la excepción a esto. En esta zona se produce una dinámica donde confluyen las aguas de mar, las aguas superficiales del río Salado y las aguas subterráneas contenidas en el acuífero costero. Además, a lo largo del río Salado ha existido una intervención, donde se ubican diversos depósitos provenientes de instalaciones mineras muy cerca o en el mismo cauce, ocasionando así que el material sea arrastrado hacia aguas abajo, llegando finalmente a la playa de Chañaral. Posterior a los eventos aluvionales del año 2015, en la playa de Chañaral, se formaron 2 lagunas que aún persisten, y que a fines de 2020 se identificaron dentro del Inventario Nacional de Humedales del MMA como humedal urbano (HUR-03-01).

Con el objetivo de caracterizar hidrogeoquímica e isotópicamente las aguas superficiales, subterráneas y marinas del sector de la playa de Chañaral, se encuentra en desarrollo un estudio de la condición actual del sistema, donde además de contar con los datos históricos, se desarrollan 2 campañas de monitoreo durante el año 2023 (invierno y primavera). En estas campañas se consideran las lagunas de la playa, el río Salado, el agua de mar en la orilla de playa y el agua subterránea desde pozos dentro de la playa. En todos estos puntos se miden 40 parámetros de laboratorio (cationes y aniones mayores, metales y metaloides, parámetros microbiológicos y fisicoquímicos), además de parámetros in situ (pH, CE, TDS, OD y T°).

Como resultado se determina una línea base hidrogeoquímica para las aguas superficiales y subterráneas de la playa de Chañaral, junto con los procesos que intervienen en ellas y la distribución de contaminantes de origen minero como As, Cu, Mn, Pb, entre otros. Esto se logra mediante análisis espaciales y estadísticos multivariados. Además, se compara esta información con las normativas chilenas, así como las normativas canadiense, australiana y neozelandesa, que cuentan con apartados especiales para ecosistemas acuáticos y que permiten dar cuenta del grado de afectación del área de estudio y de la aplicabilidad que tendrían para esta zona en particular.

De esta forma, este estudio conceptualiza la dinámica de las aguas de la playa de Chañaral, proporcionando información sobre estos cuerpos de agua designados como humedales, junto con la relación que pueda existir con el resto de las muestras.

Palabras Clave: Geoquímica, Isotopía, Humedal.

Legado geoquímico de la Minería: Evaluación de contaminación en sedimentos de suelos cercanos a residuos mineros en Alhué, Región metropolitana

Estefanía Muñoz¹, Álvaro Navarrete²⁻³, Camilo Sánchez²⁻³

(1) Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Av. Ejército 146, Santiago, Chile

(2) Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(3) Cobrizo, Geología Ambiental, Casa Matriz Linares, Región del Maule, Chile

La minería en Chile desempeña un papel vital en términos de crecimiento económico, siendo uno de los principales productores de cobre a nivel mundial. Según la BCN, es responsable de la generación directa del 14,6% del PIB, aunque si se agregan los efectos multiplicadores que tiene en otras industrias su contribución al PIB nacional rondaría el 20% en 2023. Además, nuestro país también cuenta con extracción de oro, plata y otros metales. Sin embargo, el desarrollo minero también ha tenido un costo ambiental significativo a lo largo de su historia, debido a la generación de residuos asociados al proceso metalúrgico, y, es por esto, que su adecuada gestión es crucial para minimizar la contaminación al medio ambiente y el potencial perjuicio a la salud de la población. En este sentido, realizar estudios de evaluación geoquímica de sedimentos en áreas de influencia minera es un paso base en la gestión ambiental, colaborando a impulsar estrategias de mitigación por parte de la industria y/o instituciones ambientales del estado.

Este estudio aborda el caso de Alhué, localidad reconocida por su actividad agrícola y minera, cuya población y ecosistemas son potencialmente afectadas por estar en las cercanías de residuos mineros: un botadero y relave activos provenientes de las operaciones de oro, plata y zinc de la zona; así como también un pasivo ambiental de tipo relave abandonado. Según estudios previos, es altamente probable que la minería local contamine los sedimentos del estero Alhué con metales/oides como As, Pb y Zn, donde el Pb se muestra superior a la media global de los sedimentos de Sparks (1995), superando en 22,1 ppm y el Zn en 40,6 ppm. Sin embargo, se desconoce el estado actual de las características geoquímicas de sedimentos en suelos que puedan estar asociados al crecimiento de los residuos mineros de la zona, especialmente en los últimos 10 años, cuando fue aprobado el proyecto de expansión del botadero activo. Es por esto, que este trabajo evalúa la influencia que puedan generar estos residuos mineros sobre los sedimentos de suelo cercanos a las faenas mineras y localidades urbanas, y evaluar la calidad ambiental respecto de normativas internacionales.

Como metodología, se tomaron 7 muestras de suelo en puntos cercanos a las quebradas colindantes a los pasivos mineros, hasta la Plaza de Armas de la localidad de Alhué. Estas muestras fueron sometidas a un análisis multielemental mediante ICP-OES, previa digestión ácida mediante agua regia.

Para la evaluación ambiental de contaminación de suelos, los resultados de la geoquímica de suelos fueron comparados con dos normativas internacionales, a falta de una norma de suelo chilena. La primera fue la guía de calidad ambiental consensuada de sedimentos de MacDonald (2000), complementada por datos de Buchman (2008), en este tipo de normas existen 2 parámetros, TEC y PEC, que corresponden a *Threshold effect concentration* y *Probable effect concentration*, respectivamente. En segundo lugar, fue utilizada una normativa canadiense para sectores industriales y residenciales. Los resultados indican que los parámetros más peligrosos en términos de superar las normativas son: Cu, Cr, Pb y Zn.

Estos resultados indicarían que existe una interacción geoquímica o física entre los pasivos mineros y el medio ambiente, lo que se traduce en procesos de meteorización química o física, que movilizan contaminantes mediante mecanismos de transporte superficiales mediados por condiciones ambientales locales.

Por otro lado, los resultados anteriores fueron contrastados con indicadores ambientales y de anomalías geoquímicas, como son el factor de contaminación y el factor de enriquecimiento respectivamente. Este último calculado según el estudio base de Castillo (2009) y el promedio composicional de la corteza de Sparks (1995), para Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y Mg. Dando como resultado para este último que el promedio de concentraciones para algunos elementos como el Pb son de origen antropogénico y para el factor de contaminación se clasificaron con una alta a muy alta contaminación para los elementos de Pb, Zn, y Cu.

Finalmente, los promedios obtenidos para los sedimentos de esta investigación demuestran estar en incumplimiento con la normativa de suelo internacional, siendo el Pb y el Cr, los más peligrosos para el ecosistema y la población.

Palabras Clave: contaminación, residuos mineros, normativa ambiental.

Financiamiento: Propio.

Referencias:

- Buchman, M. F. (Ed.). (2008). Screening quick reference table for inorganics in sediment. NOAA screening quick reference tables: NOAA OR&R report 08-1 [Internet], 34.
- Castillo, P. (2009). Geoquímica y evaluación ambiental de los sedimentos fluviales del sistema hidrográfico Alhué, Cordillera de la Costa, Chile Central. Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago 22, S1_005.
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Archives of environmental contamination and toxicology, 39(1), 20-31.
- Sparks, D., (1995). Environmental soil chemistry, Academic Press, San Diego, California, 267 p.

Soil contamination by dust from tailing deposits in Northern Chile: The role of local atmospheric circulation

Alexey Novoselov¹, Natalia Novoselova¹, Javiera Paz Gerding González¹

(1) Universidad de Concepción, Instituto de Geología Económica Aplicada, Concepción, Chile

The mining activities, both exploration and processing of polymetallic ores, and the resulting tailings deposited in dams emit suspended dust particles. This airborne particulate emission is one of the reasons for the many health and environmental concerns of the neighboring population. Some of them are real, some are not. In this context, the understanding of mechanisms and precise geographic distribution of dust linked contamination associated with mining is highly required by local people and mining personnel. The most contaminated areas should be mapped, avoided for usage, and recultivated, i.e. by vegetation.

The eolian transport of dust from mining facilities is one of the main drivers of metal pollution. Being atypical for the surrounding environment and lacking vegetation, the surface of tailing deposits provides the extreme heating during daylight (up to 60°C), triggering the formation of thermals. Thermals, or upward warm air fluxes, form above hotspots or zones with high contrast in surface temperatures. Those upwind movements lift the dust particles at significant altitudes of hundreds of meters. A part of airborne particles comes in upward tropospheric layers. However, the most dust emission falls out around the tailing deposits forming a spot-like contamination.

In the course of this research, we studied the soil contamination caused by wind-driven emissions from the Cerro Dominador tailing and slag deposit. These tailings are located near the Sierra Gorda mine in the Antofagasta region, 60 km southwest of the city of Calama, and are exposed to erosion under arid climatic conditions. The facility has been operational since 1989 and has processed polymetallic ores. Starting around 2000, the deposit began receiving slag from the Chuquicamata smelter, and since 2003, metallurgical dust. These materials are able to emit specific airborne dust particles that contaminate soils up to 6 km east of the tailing deposit, exhibiting both toxicity and distinctive black colors. This characteristic makes remote sensing techniques particularly suitable for analysis. Utilizing satellite imagery from Landsat 8 (with resolution of 30 m), ASTER (90 m), and Sentinel 2 (10 m), we generated a series of maps depicting the temporal dynamics of dust fallout from 1989 to 2022. Specifically, we created maps based on normalized difference vegetation index (NDVI) and short infrared (SWIR) composite images. These maps were further refined using K-means clustering. By comparing the location of contamination patches with wind statistics, we determined that soil contamination is primarily driven by thermal circulation in the mixed layer of the atmosphere. This approach can be employed for monitoring and environmental management of mining facilities in arid and semi-arid climatic conditions.

Keywords: Tailings, Soil contamination, Dust emission.

Financing: Proyecto VRID UdeC N°2021000211INI.

Indicadores ambientales y distribución de elementos prospectivos en sedimentos de corriente de la Hoja Taltal, Región de Antofagasta y de Atacama, Chile

Pablo Oliva Vicentelo¹, Felipe Astudillo Wells², Juan Pablo Lacassie Reyes², Rafael Mardones Parada³

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Av Luis Beretta Porcel 2964, Arica, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Aníbal Pinto 2031, Valdivia, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geoquímica, Av. Santa María 0104 Providencia, Santiago, Chile

El programa de geoquímica del Plan Nacional de Geología ha permitido definir las primeras líneas de base geoquímicas de Chile, las cuales incluyen concentraciones de elementos químicos con efectos potenciales sobre la salud humana y ambiental, tales como arsénico, mercurio, plomo o cinc. Estas líneas de base geoquímicas posibilitan la evaluación medioambiental de las áreas estudiadas, el diseño e implementación de planes de monitoreo y de ordenamiento territorial, tanto a escala regional como de cuenca fluvial. Asimismo, los datos geoquímicos y sus productos asociados permiten la definición de zonas prospectivas, que se caracterizan por anomalías geoquímicas multi-elemento en las áreas o cuencas estudiadas. Estas anomalías incluyen desde elementos tales como cobre, hierro u oro, hasta otros elementos considerados como estratégicos para el desarrollo de tecnologías avanzadas, como son el cobalto y los elementos del grupo de las tierras raras.

La concentración de los elementos químicos en los sedimentos depende del material parental del cual provienen, pero también esta concentración puede alterarse por actividades humanas como la minería, la agricultura, la contaminación urbana, etc. Es por este motivo que es importante entender los valores naturales o *background* de un territorio y si existen componentes antropogénicas que alteren estos valores.

La Base de Datos de Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Taltal contiene información geológica, geoespacial y química de 761 muestras, asociadas a 715 puntos de muestreo. Al igual que publicaciones similares previas, el presente texto incluye información detallada acerca de los protocolos y metodologías utilizadas para la recolección, preparación y análisis químico de las muestras, además del control de calidad de los resultados.

Las muestras recolectadas corresponden a sedimentos de cauces fluviales activos e intermitentes (697 muestras), de terrazas fluviales (6 muestras), de planicies aluviales o pampas (57 muestras) y de relaves (1 muestra). De estas, 40 corresponden a muestras gemelas de los diferentes ambientes, según la definición de Simón (2011). En otras terminologías se le conoce como duplicados de terreno. Adicionalmente, la base de datos incluye muestras de control, correspondientes a 34 de material de referencia certificado y 32 duplicados de pulpa.

Este trabajo presenta el análisis de indicadores ambientales tales como el factor de enriquecimiento y el índice de geoacumulación del área de la Hoja Taltal. Estos índices se han utilizado para determinar la presencia e intensidad de las actividades antropogénicas. Por otro lado, este trabajo, muestra la distribución de elementos de carácter prospectivo como el Cu, Au, Mo que se relacionan a los distritos mineros metálicos auríferos del área estudiada. Asimismo, se muestra la distribución de algunos elementos del grupo de las tierras raras.

Palabras Clave: Igeo, Factor de enriquecimiento, Distrito aurífero, PNG, Sedimentos.

Financiamiento: Plan Nacional de Geología - Servicio Nacional de Geología y Minería.

Referencias:

- Simón, A. 2011. A Discussion on Current Quality-Control Practices in Mineral Exploration. In Applications and Experiences of Quality Control. InTech. doi: 10.5772/14492.

Hidroquímica de los humedales urbanos de la Región de Valparaíso, posibles impactos antropogénicos e industriales en los Humedales

Isidora Paz Ortiz Ramos¹, Camilo Sánchez¹, Álvaro Navarrete¹

(1) Universidad Mayor, Geología, Manuel Montt, Av. Manuel Montt #367, Santiago, Chile

A nivel mundial, los humedales ocupan cerca del 6% de superficie terrestre (según la estimación del PNUMA-Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación) y corresponden a uno de los sistemas naturales más complejos y variados existentes. Estos poseen múltiples funciones ecosistémicas, como otorgar hogar permanente o de paso a una gran variabilidad biológica, además corresponden a suministros de agua dulce aportando a la recarga de aguas subterráneas, regulan el clima y controlan las crecidas, pero por otro lado también poseen un interés cultural, recreativo e incluso religioso.

Los humedales urbanos corresponden a todos los humedales que se encuentran total o parcialmente dentro de los límites urbanos, los cuales serán protegidos bajo la ley N°21.202 si son declarados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) como humedales urbanos. Esta ley se encarga de resguardar este tipo de ecosistemas, pero no vela por las condiciones hidroquímicas con las que el humedal entró a categoría de humedales urbanos protegidos, ante esto, cabe preguntarse ¿Cuáles son las condiciones hidroquímicas de los humedales urbanos declarados?

El presente estudio busca analizar, en base a información bibliográfica, los humedales urbanos presentes dentro de la región de Valparaíso, los cuales se encuentra amenazados por el área industrial, como es el caso de la fundición Ventanas de Codelco, estableciendo donde se encuentran, si es que se encuentran protegidos, cual es su estado de conservación, si poseen estándares químicos aceptables (conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos, metales esenciales y no esenciales disueltos, etc.) respecto a la normativa chilena (Nch 1333 y Guía CONAMA), entre otros criterios. Actualmente existen 18 humedales urbanos reconocidos bajo la Ley N°21.202 en la región de Valparaíso y los resultados preliminares de esta investigación han dado como resultado que el Humedal Campiche-Los Maitenes y el Estuario Los Molles poseen elementos químicos potencialmente tóxicos de origen geogénico, atribuibles a la influencia de sectores industriales y urbanos cercanos.

Palabras Clave: Humedales urbanos, contaminación, hidroquímica.

Geomicrobiology and climate in a high-altitude salt flat of the Chilean Altiplano: inferences in a scenario of global warming

Pablo Paquis¹⁻², Coral Pardo-Esté¹, Joseline Tapia³, Vilma Pérez⁴⁻⁵, July Florez¹⁻⁶, Verónica Molina⁶⁻⁷, Martha B. Hengst¹

(1) Departamento de Ciencias Farmacéuticas, Facultad de Ciencias, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(2) Programa de Doctorado en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(3) Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(4) Australian Centre for Ancient DNA, School of Biological Sciences, University of Adelaide, Australia

(5) ARC Centre of Excellence for Australian Biodiversity and Heritage, University of Adelaide, Australia

(6) Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas y HUB Ambiental, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile

(7) Centro COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

The Salar de Huasco Wetland, located at an elevation of 3,800 m a.s.l. in the Chilean Altiplano, is an endorheic basin characterised by extreme climatic and environmental conditions with minimal human intervention. This site boasts a rich biological diversity primarily driven by microorganisms that play a pivotal role in supporting biogeochemical cycles in response to environmental variables such as solar radiation, water and air temperature, wind intensity and direction, and precipitation. Microbial activity significantly contributes to mineral formation and the availability and recycling of macronutrients like carbon, nitrogen, sulphur, and phosphorus. Consequently, this ecosystem serves as an ideal model for studying the interaction of biological, environmental, and geochemical variables in a scenario of climate change.

Microbial community structures are influenced by geochemical factors and their interactions with the lithosphere, hydrosphere, and atmosphere, driven by processes such as chemical mobilisation and mineralization. High-altitude wetlands and salt flats in the central Andes are notable for their pronounced physicochemical gradients and extreme climatic conditions, making them hotspots of microbial diversity. This research investigates the dynamics of microbial communities in response to short-term climatic and biogeochemical patterns, temporarily shaping the wetland's structure by correlating 16S (cDNA and DNA) gene Illumina sequences with meteorological/satellite data collected from monitoring stations and remote sensing between 2015 and 2020.

Our investigation reveals that Salar de Huasco constitutes a complex and cyclic ecosystem, characterised by substantial spatial heterogeneity in geochemical conditions. This high-altitude wetland experiences significant climatic fluctuations, impacting water availability, and giving rise to distinct dry (December to April) and wet (May to November) seasons. Microbial communities are the predominant life forms, shaping complex structures, notably microbial mats, primarily in the main lagoon and temporary pools. Revealing that fluctuations in water availability during the study period corresponded to variations in physical and chemical water parameters, influences the microbial community composition and nutrient cycling.

The adaptability of these ecosystems to extreme conditions and the potential existence of a stable core microbiome underscores the significance of microbial functional redundancy and the impact of seasonal changes on microbial diversity, in a context of accelerated climate change.

Palabras Clave: Geomicrobiology, Remote Sensing, Hydrometeorology.

Financiamiento: Fondecyt regular N° 1140179, 1140356, 1171324, 1181773, 1211515, 1211977. Basal Financing Fund for Centers of Excellence CeBiB FB0001. Paquis, P is funded through an ANID PhD scholarship N° 21221380. Pardo-Esté, C. is funded through an ANID Postdoctoral fellowship N° 3230189. Pro-Fondecyt regular UCN-VRIDT "Adaptation mechanisms of microbial communities in high-altitude geothermal environments and their importance in understanding the origin of life on primordial Earth."

Dinámica del mercurio total y análisis isotópico en el sistema hídrico en periodo de deshielo para la cuenca Río Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile

Macarena Pérez Flores¹⁻², Gabriel Rambaldi³, Sebastián Crespo⁵, Francisco Fernandoy³, Iván Sola¹⁻⁷, Gabriela Lobos⁶, Lars-Eric Heimbürger-Boavida⁴, Celine Lavergne¹

(1) HUB AMBIENTAL UPLA, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile

(2) Doctorado Interdisciplinario en Ciencias Ambientales, Universidad de Playa Ancha, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Valparaíso, Chile

(3) Universidad Andrés Bello, Valparaíso, Chile

(4) Aix-Marseille University, Mediterranean Institute of Oceanography, Marseille, Francia

(5) Instituto Argentino de nivología, glaciología y ciencias ambientales (IANIGLA-CONICET), Mendoza, Argentina

(6) Laboratorio de Química Analítica y Ambiental, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

(7) Departamento de Ciencias Marinas y Biología Aplicada, Universidad de Alicante, Alicante, España

El mercurio (Hg) es un contaminante neurotóxico considerado por la Organización Mundial de la Salud como una de las diez sustancias químicas de mayor preocupación para la salud. Es liberado a partir de fuentes: 1) naturales como el contacto de agua-roca, actividad volcánica, fuentes geotermales y/o 2) fuentes antrópicas como pequeña y gran minería, vertederos, centrales eléctricas, entre otros. Una vez liberado, el Hg puede ser transportado a largas distancias y depositado en ecosistemas acuáticos, así como en la criosfera donde puede ser almacenado por décadas hasta ser liberado en épocas de ablación. Desde 2018, Chile es uno de los 17 países adscritos al convenio de Minamata, comprometido con las emisiones, el destino y la toxicidad del Hg. A la fecha, el Hg es un campo de investigación poco desarrollado. Este trabajo representa una línea base en el estudio del Hg total y su forma tóxica el metilmercurio (MeHg) para la zona centro del país. Con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre la dinámica del Hg a lo largo de la cuenca del Aconcagua, el presente trabajo propone estimar la cantidad de Hg total (tHg) y MeHg liberado por el glaciar Juncal Norte, mediante la determinación de las concentraciones de tHg en sedimentos y el análisis de fuentes de aporte hídrico desde el glaciar Juncal Norte (GJN) hasta el mar.

En marzo 2022 (verano), se realizó una campaña de muestreo con un total de 23 puntos a lo largo del río Aconcagua, así como de sus afluentes: ríos Juncal, Putaendo, Colorado y Saladillo, con el fin de comprender la dinámica del Hg en el sistema hídrico. Para ello, se tomaron: i) muestras de sedimento en triplicados ($n=56$) para la determinación de Hg total (tHg), a través de absorción atómica (DMA-80), ii) muestras de agua filtrada (filtro 0,22 μ m) de río ($n=20$) y iii) muestras de precipitación filtradas ($n=6$). Para la estimación del aporte de las diferentes fuentes de agua (Glaciar, Periglaciar, Nieve, Lluvia y Aguas Subterráneas) se midieron isótopos de agua por medio de espectroscopía de anillo de cavidad. Por último, la medición de tHg en agua emitida por el glaciar ($n=3$) fue realizada mediante espectroscopía de absorción atómica de vapor frío (CVAFS) y MeHg por dilución de especies de isótopos específicos por cromatografía de gases, así como por espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP MS) ($n=3$). Determinamos gracias a su firma isotópica, que el río Juncal (sector alto y naciente de la cuenca) se origina en mayor proporción desde los sistemas glaciares (46%) y periglaciares (24%), mientras que el río Aconcagua (sector medio y bajo) arrojó una firma dominante proveniente de aguas subterráneas (57%) y precipitaciones (20%), confirmando que la recarga de los acuíferos en la cuenca corresponde a lluvia. En periodos de ablación, tales como el verano, se estima que el GJN pierde en volumen aproximadamente un 22%. En base a esto, realizamos la primera evaluación de la cantidad de Hg liberado por el GJN durante el periodo de deshielo, alcanzando un promedio de 1,61 kg de Hg y 0,038 kg de MeHg liberados. Dichos valores son comparables con estudios de cuencas Árticas o glaciares fuera de Chile, donde el GJN, en una temporada, libera lo que en lugares como Canadá acumulan en 5 años.

A lo largo de la cuenca río Aconcagua existen lugares con potencial riesgo de contaminación por emisión de Hg en el sistema fluvial. Los sedimentos arrojaron que los valores más elevados se ubican en el lago pro glaciar Juncal (164 ng Hg/g PS) así como la desembocadura del río Aconcagua (35 ng Hg/g PS). Por un lado, el sector alto de la cuenca es afectado por la liberación de Hg a partir del constante derretimiento glacial en contacto con la litología de composición volcánica que compone Los Andes. Si bien, el contenido de Hg disminuye cuenca abajo, esta sigue presentando valores asociados al derretimiento del glaciar en el curso del Río Juncal. El sector medio o centro de la cuenca, presenta riesgo por Hg como resultado de la deposición de contaminación atmosférica que afecta este sector de la cuenca, o bien, asociándose a la descarga realizada por hidroeléctricas o plantas de tratamiento residuales. Finalmente, el sector bajo de la cuenca, si bien no posee valores elevados en cuanto a concentraciones de Hg, es posible asociarla a una alta concentración de materia orgánica que es metabolizada por microorganismos anaeróbicos existentes en el humedal de Concón

El análisis del contenido de MeHg en sedimentos dará indicaciones sobre el potencial origen del Hg en la cuenca. En un contexto de cambio climático y de mega sequía, se espera que el GJN siga derretiéndose con mayor velocidad y que el estudio del destino del mercurio en la cuenca, permita predecir el impacto sobre los componentes bióticos y abióticos del río.

Palabras Clave: Mercurio, Glaciar Juncal Norte, Andes Centrales, Isótopos de agua, Derretimiento.

Financiamiento: Agradecemos a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por el apoyo financiero a través del proyecto de cooperación internacional n° ECOS210007/C21B01 y el proyecto FONDECYT 11201072.

Agradecimientos: Al Laboratorio de Análisis Isotópicos UNAB, al Parque Andino Juncal por la colaboración y compromiso así como los habitantes de la cuenca que apoyaron con acceso al río y conocimiento local.

Geoquímica y mineralogía del material suspendido en el Humedal Campiche-Los Maitenes y del material de caída en zonas urbanas de Puchuncaví

Moisés Pizarro Colipan¹, Álvaro Navarrete Calvo²⁻³, Camilo Sánchez Yañez²⁻³, Pierre-Yves Descote⁴

(1) Escuela de Geología, Universidad Andrés Bello

(2) Escuela de Geología, Universidad Mayor

(3) Cobrizo Geología Ambiental

(4) Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile

La comuna de Puchuncaví es conocida como una zona de sacrificio hace más de dos décadas, debido a la contaminación que existe y su aparente relación con el Complejo Industrial Ventanas (CIV). Dentro de las empresas que componen el CIV, se encuentran una refinería de hidrocarburos, una fundición de cobre, una termoeléctrica, entre otras. Estas, por su naturaleza industrial, han aportado diferentes contaminantes a la atmósfera, tales como SO_x, NO_x (Liberona Céspedes & Ramírez Rueda, 2019). En el sector oriente al CIV, se ubica el humedal Campiche – Los Maitenes, el cual presenta dos cuerpos de aguas los que son alimentados por el Estero Puchuncaví. Mediante los resultados de estudios previos sobre la hidroquímica del humedal, se determinó la diferencia entre la concentración de cationes totales y cationes disueltos, con el propósito de calcular la fracción de cationes que estarían como partículas suspendidas en el agua, es decir, en fase sólida. Estos valores de fracción sólida en agua fueron significativos para metales/lóides como Cd, Ag, Al, Co, Cr, Cu, Fe, Li y Zn. Además, se desconocen las características geoquímicas y morfológicas del material particulado que entra en contacto con las aguas de los Humedales Campiche-Los Maitenes y el material que precipita en la localidad de Ventanas. Debido a esto, este estudio pretende determinar la geoquímica de los sólidos en suspensión en el agua, así como también la del material particulado atmosférico en la localidad de Puchuncaví, caracterizar la morfología de estos y evaluar su procedencia.

Las muestras del material de caída fueron obtenidas en la localidad urbana de Puchuncaví mediante una placa de aluminio con cinta de carbono de doble cara, al norte del CIV, mientras que las muestras del humedal fueron tomadas in situ utilizando filtros de fibra de vidrio de 0,45 µm de 47 mm de espesor, filtrando por vacío las aguas presentes en la zona, cercanas al lado oriente del CIV. Cada muestra fue analizada por medio de un difractor de rayos X de marca Bruker, modelo D8 Advance, para muestras policristalinas con un ánodo de Cobalto y un microscopio electrónico de barrido de marca TESCAN, modelo VEGA 3LMU, implementado con EDX y SE, para identificar las fases minerales presentes y determinar la existencia de partículas amorfas, y determinar la composición elemental y morfología de los sólidos en suspensión, respectivamente.

De esta forma, se definirá la presencia de las fases minerales presentes, la composición elemental y la morfología del material particulado atmosférico, tanto en las muestras de la localidad urbana como las del humedal.

Los resultados permitirán realizar una comparación de las fases minerales y morfologías encontradas entre las partículas presentes en el humedal y aquellas existentes en la localidad de Puchuncaví, con la finalidad de establecer una relación entre ellas. Además, según la morfología del material de caída y estudios anteriores se evaluará si el CIV es la fuente principal de la contaminación presente en la localidad de Puchuncaví. Por último, se espera que este tipo de caracterizaciones geoquímicas pueda contribuir al estudio del impacto ambiental en los humedales Campiche y Maitenes en la localidad de Puchuncaví, así como a las autoridades, para mejorar el control o regulación de emisiones en la zona, con fines de preservación medioambiental y de salud de la población.

Palabras Clave: Material particulado, Geoquímica, Mineralogía, Contaminación.

Agradecimientos: Los autores reconocen el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S.-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio realizado.

Geoquímica de los sedimentos fluviales activos del río Lingue

Daniela Pizarro Gaete⁴, Violeta Tolorza Tolorza¹, Nicole Colin Muñoz², Fernanda Álvarez Amado³

(1) Universidad de la Frontera, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Ciencias

(2) Universidad Austral, Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas

(4) Universidad Austral

La geoquímica de los sedimentos fluviales activos puede responder a las condiciones hidrodinámicas de una cuenca y ser el resultado de los procesos de erosión y meteorización existentes. La interacción entre las tasas de erosión y meteorización es controlada por el suministro de material fresco y la cinética de reacciones químicas. Durante la meteorización, los elementos móviles son removidos preferencialmente versus los inmóviles, resultando en sedimentos fluviales activos con una menor razón móvil/inmóvil. La erosión de los suelos, deforestación y cambio climático, pueden inducir efectos en la tasa de erosión superficial, y, en consecuencia, en la química de los sedimentos. Se compararon análisis geoquímicos en sedimentos fluviales activos (fracción <180µm) provenientes de captaciones con distintas coberturas vegetales pero similar litología y topografía en el río Lingue. La cuenca posee una superficie de 521 km², ubicada entre los 73.200° – 72.800° de latitud sur y 39.200° – 39.600° longitud oeste. Se emplaza principalmente en rocas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa y en cuatro unidades hidrogeológicas. La topografía se caracteriza por pendientes pronunciadas cubiertas en su mayoría por renovales de bosque nativo y plantaciones forestales.

La caracterización de la cobertura vegetal se realizó a partir del proyecto Land Cover Chile 2014 y la elevación desde el producto TanDEM-X ©DLR 2017 (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). Se identificaron 21 sub-captaciones dentro de la cuenca, de las cuales se muestrearon 8, equivalentes al 55,63% de la superficie total. Además, se delimitaron dentro de estas localidades 3 zonas de interés dadas sus características de cobertura vegetal y se asignó un punto de muestreo en el sector estuarino del río.

Se evaluó si existen diferencias en la geoquímica (análisis ICP-ES-MS), a través de los índices de meteorización Chemical Index of Alteration (CIA), Weathering Index of Parker (WIP), Plagioclase Index of Alteration (PIA) y Ruxton, además de fraccionamiento REE y granulometría contra variables topográficas, de cobertura de suelo y mixtas.

La estimación de contaminación por metales y metaloides se realizó mediante el parámetro PEC (Probable Effects Concentration) y se describió la relación entre los datos químicos y las variables cobertura/topografía mediante análisis de componentes principales (PCA), análisis Permanova y matrices de correlación. Los resultados señalan variaciones en la composición, pero con contenidos en SiO₂ y Al₂O₃ homogéneos. Los parámetros CIA y PIA muestran buena correlación ($r^2=0,998$), en tanto, el índice de Ruxton versus PIA/CIA/WIP están bien correlacionados ($r^2=-0,68$ / $r^2=-0,66$ / $r^2=-0,46$). El indicador CIA es el único correlacionado a praderas y matorrales ($r^2=-0,66$ y $r^2=-0,73$).

El fraccionamiento REE, representado por las razones La/Lu y LREE/HREE se correlacionan diferenciada e inversamente con plantaciones forestales ($r^2=-0,59$ y $r^2=-0,51$), sin registrar comportamientos similares con el resto de las coberturas vegetales. La razón Y/Ho se correlaciona similarmente a CIA versus praderas y matorrales ($r^2=-0,47$ y $r^2=-0,58$).

La granulometría (grano medio en Φ unidades) muestra un comportamiento diferenciado inverso contra el bosque nativo, especialmente en pendiente pronunciadas no observado en otras coberturas.

El análisis Permanova indica que los parámetros CIA/WIP y el fraccionamiento REE no generan grupos significativos entre muestras. El análisis de componentes principales (PCA) arroja comportamiento inverso entre el índice de Ruxton y la pendiente media/LOI, mientras que el fraccionamiento REE se observa asociado positivamente al bosque nativo ubicado en pendientes pronunciadas.

Los valores PEC arrojan inexistencia de niveles de contaminación capaces de generar toxicidad con excepción de una muestra. La correlación con óxidos mayores indicaría proveniencia natural de metales y metaloides. Praderas y matorrales se relacionan inversamente al parámetro PEC.

No fue posible determinar si los índices de meteorización y comportamiento de los elementos móviles e inmóviles de los sedimentos responden a causas actuales. La falta de datos mineralógicos y geoquímicos acotados a la zona de estudio impiden cuantificar el efecto de procesos superficiales en el fraccionamiento REE y elementos isovalentes versus la litología pese a la correlación con el porcentaje de cobertura.

Se concluye que la geoquímica de los sedimentos fluviales activos por sí sola no muestra un único comportamiento según la cobertura de la cuenca del río Lingue. Los perfiles de meteorización de suelo en localidades tipo, según tipo de cobertura vegetal versus sedimentos fluviales, brindarían información más detallada sobre fraccionamiento REE e isovalentes y procesos superficiales.

Palabras Clave: Geoquímica ambiental, Sedimentos fluviales, Cobertura.

Financiamiento: Trabajo financiado por el proyecto FONDECYT 11190864, cuya investigadora responsable es la Dra. Violeta Tolorza.

Proceso de evaluación de zonas potencialmente contaminadas y sus posibles técnicas de remediación: Caso de estudio planta abandonada frente Mantos de la Luna, Región de Antofagasta, Chile

Rocío Ignacia Quilaleo Riquelme¹, José Antonio Luque Marín²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 610, Antofagasta, Chile

(2) CEITSAZA, Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto, Antofagasta, Chile

Existen rubros y actividades históricas consideradas como fuentes potencialmente contaminantes, las cuales han ido en aumento con el desarrollo de la industrialización, debido principalmente al mal manejo y disposición de materiales peligrosos (Fundación Chile, 2015). De estas actividades, en el Norte de Chile la minería es especialmente relevante, lo que requiere entender sus impactos negativos sobre el medio natural y social (Oyarzún & Oyarzún, 2011).

Bajo el contexto de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras vigente desde noviembre del 2012, la cual obliga a que todas las faenas mineras cuenten con un plan de cierre, previo al inicio de las operaciones mineras y que debe contener la totalidad de las instalaciones de la faena, se dio inicio al "Catastro Nacional de Faenas Mineras Abandonadas y/o Paralizadas" el que incorpora una evaluación preliminar de los riesgos con el fin de enfocar esfuerzos hacia aquellas zonas que resulten prioritarias (SERNAGEOMIN, 2007), dentro de este catastro se encuentra la Planta abandonada de la Compañía Mantos de la Luna, área en la que se basa este estudio.

El objetivo de esta presentación es ejemplificar un proceso de evaluación de los niveles de contaminación para zonas que están potencialmente contaminadas a través de la evaluación de la distribución de la concentración de elementos metálicos potencialmente tóxicos en caso de estudio de Planta Abandonada en la región de Antofagasta.

El proceso de evaluación se llevó a cabo a través del muestreo geoquímico previo, revisión de estudios preliminares, comparación de concentraciones de elementos potencialmente contaminantes (EPC) presentes con los niveles permitidos por normativas internacionales, generación de mapas de isoconcentraciones y elaboración de un Modelo Conceptual del Emplazamiento de la Contaminación. Finalmente, se analizaron diferentes técnicas de remediación para evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas según nuestro estudio de caso.

En Chile existen regulaciones que contribuyen o pretenden evitar la contaminación del suelo, de carácter precautorio general o sectorial y que consideran el ciclo de vida de las actividades económicas y los materiales, tales como la Ley N° 20.551 de Cierre de Faenas Mineras, el Decreto Supremo N° 78 del Ministerio de Salud para el Almacenamiento de Sustancias Peligrosas y el Decreto Supremo N° 148 del Ministerio de Salud para el Manejo de Residuos Peligrosos (Centro Nacional del Medio Ambiente, 2014). Sin embargo, a la fecha, no se ha dictado una ley que regule el uso de suelo, para su conservación y remediación en el caso de producirse su deterioro por la contaminación derivada de actividades contaminantes (Fundación Chile, 2012), no obstante, el último periodo se ha venido trabajando en el Proyecto de Ley General de Suelos, el cual pretende establecer las normativas orientadoras.

En nuestro caso de estudio se obtuvo una zonificación de los niveles de contaminación con valores que se pudieron comparar con normativas internacionales y con los valores de la ciudad de Tocopilla (*background* geoquímico), resultando que tanto las concentraciones de cobalto y cobre se encuentran con valores superiores a los que tienen las muestras de la ciudad y también se encuentra por sobre los valores promedio de la corteza terrestre. A partir de la fotointerpretación de la imagen satelital y de la información recopilada, se infirieron los componentes que permitieron generar el Modelo Conceptual del Emplazamiento, la comparación de estudios de casos por su parte permitió generar tablas comparativas con diferentes parámetros para evaluar las distintas opciones de remediación.

Los resultados confirman que efectivamente, existen concentraciones de al menos cuatro elementos potencialmente contaminantes (Cr, Cu, V y Zn), de acuerdo con distintas normativas internacionales y por medio de este análisis integrado, se presenta un Modelo Conceptual del Emplazamiento de la Contaminación de nuestro caso de estudio. El Modelo Conceptual del Emplazamiento más la distribución espacial de EPC, nos muestra que el material contaminado se expone a diferentes mecanismos de erosión y por ende a distintas vías de migración, de lo que se infiere que un evento de precipitación podría arrastrar la contaminación por medio de las redes de drenaje, lo que afectaría potencialmente a la flora y fauna costera. Finalmente se presenta una comparación de estudios de casos junto a una propuesta para el uso de técnicas de remediación tanto para suelos como para aguas subterráneas en el área estudiada.

Palabras Clave: Contaminación, Remediación, EPC, Isoconcentraciones, Medioambiente.

Agradecimientos: Los datos geoquímicos fueron aportados por el Sr. Roberto Villablanca, profesional a cargo de la EAE de la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente, Antofagasta (2019).

Referencias:

- Fundación Chile. (2015). Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados. Chile. Obtenido de https://fch.cl/wpcontent/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitioscontaminados_baja-1.pdf.
- Oyarzún, J., & Oyarzún, R. (2011). Minería sostenible: principios y prácticas. Madrid: Ediciones GEMM.SERNAGEOMIN. (2007). Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas y análisis preliminar de riesgo. Chile. Obtenido de <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/13090.pdf>.
- Centro Nacional del Medio Ambiente. (2014). Diagnóstico Regional de Suelos Abandonados con potencial Presencia de Contaminantes.
- CENMA.Fundación Chile (2012) Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, junio de 2012, 1-147p. Chile.

Micromorfologías del material particulado depositado en zonas urbanas de Puchuncaví, Región de Valparaíso

Macarena Quiroz¹, Camilo Sánchez Yáñez¹⁻², Eduardo Morgado Bavo¹, Álvaro Navarrete Calvo¹⁻²

(1) Universidad Mayor, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Santiago, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Cobrizo, Geología Ambiental, Casa Matriz Linares, Rucalhue 730, Región del Maule, Chile

El material particulado, es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados a nivel mundial, ello debido a que proporciona un posible riesgo a la salud de la población al ser una sustancia inhalable, lo que se sumado a poseer propiedades aerodinámicas de control climático. Es conocido como MP10 y MP2.5 por sus siglas en inglés (particulate matter) y sus tamaños en micras. Es definido como una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire (EPA). Se caracterizan por proceder de variadas fuentes naturales o antropogénicas con diversas propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas. La composición del material particulado puede ser de distinta naturaleza, entre ellas compuestos metálicos los cuales no son biodegradables y son de naturaleza acumulativa según de acuerdo a lo señalado por Wong (2006) en el estudio *Urban environmental geochemistry of trace metals*. Environmental Pollution 142, 3. Debido a esta causa, su estudio y caracterización cobra relevancia, sobre todo, en las localidades urbanas de alta contaminación atmosférica, como es el caso de Quintero-Puchuncaví.

La investigación micromorfológica de material particulado, fue realizada mediante el método de Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersada reconocidas por sus siglas en inglés SEM/EDX (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray spectroscopy), con el objetivo de analizar y caracterizar las partículas metálicas de cada muestra. La forma de realización del estudio se llevó a cabo con la caracterización del material particulado depositado (MP), suelo y polvo según su tamaño, morfología, componentes y/o fases minerales estimadas, a fin de determinar posibles fuentes, similitudes y diferencias.

En base a los principales resultados obtenidos, se determinó que, en el material particulado depositado, se presentaron en orden de abundancia, según el tipo de morfologías tales como, texturas amorfas, superficie lisa, esféricas, formas cristalográficas (prismáticas, hexagonal, tabulares), aglomerados y algunos pocos con textura dendríticos. El contenido de metales acumulados de Cu, Zn, As y Pb se presentan en las muestras más cercanas al complejo industrial Ventanas NW, con similar comportamiento en las muestras de polvo. Distinto es el caso de las muestras de suelo, las cuales no presentaron un patrón claro en términos de acumulación de estos metales.

Las agrupaciones elementales principales son, óxidos de Fe, sulfuros y sulfatos. Los óxidos Fe, se caracterizaron por presentar morfologías amorfas, tipo prismáticas, tabulares asociadas principalmente a cristales de magnetitas y goethitas y otras morfologías tipo esféricas. Este grupo se presenta en mayor medida en los muestreos de suelo. Los sulfuros y sulfatos se caracterizaron por presentar morfologías, tabulares, prismáticas, cúbicas, rectangulares lisas e irregulares, con componentes elementales de Cu, Ba, Zn, As y Fe, los cuales se asocian a minerales como calcopirita, enargita, esfalerita, calcosina, arsenopirita y pirita, presentes en los tres tipos de muestreos. Estos se correlacionaron con la información entregada por la PGS (2015), que proporciona un enriquecimiento relativo de elementos como Cu, Zn, As, Pb, Mo, entre otros.

El cobre, debido a sus reiteradas apariciones tanto en los análisis de los materiales particulados depositados, suelo y polvo, se caracterizó por presentar fases en todos los grupos principalmente de sulfuros, sulfatos y algunos óxidos. Suelen mostrarse morfologías prismáticas, prismáticas irregulares, tabulares y esféricas. El material depositado y polvo se presentó con mayor abundancia en el sector N de la fundición ventana y en el suelo se presenta una distribución hacia NE. Estas características fueron relacionadas previamente por Parra (2014) quien identificó de tenorita encontradas las fracciones finas del suelo (Fracciones que oscilan entre 0,3 y 20 micrones).

Los resultados obtenidos del suelo y polvo en fracciones finas (menores a 15 micras) se componen de morfologías y química similares, por tanto, la distribución de metales concuerda con proveniencias relacionadas a fuentes antrópicas, documentadas para todos los trabajos de suelo ya antes mencionados, atribuyéndoles orígenes relacionados a la fundición de Cobre en Las Ventanas y a la urbanización.

Palabras Clave: Material particulado, Polvo, Suelo, Micromorfología, SEM/EDX.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración del laboratorio del Centro de Nanotecnología Aplicada (CNAP) de la Universidad Mayor por el uso de su Instrumental de Microscopía Electrónica de Barrido.

Referencias:

- EPA, United States Environmental Protection Agency.
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., et al. 2014 a. Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated soils by a copper smelting from different zones of the Puchuncaví Valley (Chile). Chemosphere, 111, 513.
- PGS SPA, 2015. Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, 2015. Ministerio del Medio Ambiente: Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, Región de Valparaíso, Santiago de Chile. Ministerio del Medio Ambiente. 173.
- Gabersek, M., Gosar, M 2020. Towards a holistic approach to the geochemistry of solid inorganic particles in the urban environment. Science of the Total Environment 763 (2021) 144214.
- Wong, C.S.C., Li, X., Thornton, I., 2006. Urban environmental geochemistry of trace metals. Environ. Pollut. 142, 3.

Impacto geoquímico ambiental de suelos cercanos al relave Las Palmas, Región del Maule

Nicole Reyes Peñaloza¹, Camilo Sánchez Yañez¹⁻², Álvaro Navarrete Calvo¹⁻², Rodrigo Cabrera Salinas³

(1) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Ingeniería y tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(2) Cobrizo Geología Ambiental, Rucalhue 730, Linares, Chile

(3) Inversiones Agromins s.a, Geología, Hda Los Ángeles s/n, Cabildo, Petorca, Chile

La minería es una de las principales actividades económicas en Chile y su desarrollo ha posicionado a nuestro país como uno de los mayores productores de cobre a nivel mundial. En este contexto, además de la construcción de faenas mineras, se han edificado numerosos tranques de relaves que contienen miles de toneladas de estos residuos semilíquidos derivados de los procesos de extracción y producción de los metales. Según un catastro elaborado por Sernageomin, en 2022 existían en Chile 763 depósitos de relaves, de los cuales 110 se mantenían activos, 7 estaban en construcción, 473 se consideraban inactivos y 173 abandonados. Entre estos últimos, destaca el tranque de la antigua mina Las Palmas, el cual tuvo un colapso en año 2010, generando importantes impactos sociales y ambientales.

La mina las Palmas se ubicaba en la comuna de Péncahue, al norte de la ciudad de Talca, en la Región del Maule, Chile. Correspondía a un yacimiento epitermal, con mineralización primaria de oro, plata, calcopirita, pirita, esfalerita y galena. Su principal producto era el oro (Au), el cual se extraía mediante un proceso de cianuración que tuvo actividad hasta 1990 y generaba residuos que se disponían en el tranque. Tras el terremoto de febrero de 2010, este depósito colapsó dispersando 2,4 hectáreas del relave en suelos aledaños, obstruyendo el Estero Las Palmas y la Quebrada Los Ladrones, y dejando a su paso como peor consecuencia 4 personas fallecidas.

Por su naturaleza, el relave esparció en la superficie distintas concentraciones de Zn, Pb, Cu, Mn, Cd y Fe, además de cianuro. La liberación de grandes concentraciones de metales y/o metaloides como los mencionados, puede causar serios daños al ecosistema, impactando la flora y fauna de los sectores afectados por el material colapsado de pasivos mineros. Con el objetivo de analizar el posible impacto geoquímico ambiental que produjo este derrame de residuos mineros en la zona afectada, en este estudio se identificaron concentraciones de elementos mayores y traza en suelos del relave y sus alrededores en base a trabajos publicados, para así determinar si se encuentran en categoría de contaminante, según normativas de suelos internacionales, y distintos indicadores ambientales.

Así, se ha establecido un fondo geoquímico promedio de 39.801 ppm de Fe, 14.877 ppm de Al, 3.972 ppm de Mg, 1.840 ppm de Mn y 1359 ppm de Ca. Además, se han identificado concentraciones promedio de Zn, Pb, Ba y Cu de 563 ppm, 234 ppm, 148 ppm y 117 ppm, respectivamente. Entre los indicadores ambientales utilizados, el índice de enriquecimiento y el factor de contaminación catalogan a las muestras con una alta a muy alta contaminación para los elementos de Pb, Zn, Cd, y Cu. Cabe destacar que en los sectores que están descubiertos de geomembrana protectora del relave colapsado, se han reconocido altas concentraciones en metales y metaloides o elementos potencialmente tóxicos (Pb, Cu, Zn, Cd, Ag, As, entre otros), los cuales podrían ser transportados por procesos eólicos.

Finalmente, el promedio de los niveles de metales y metaloides en el relave indica que el tranque Las Palmas no cumple con las normativas de suelos extranjeras. En ese contexto, la concentración de Pb es la más extrema: sobrepasa por al menos 700 ppm la norma australiana y excede en 1700 ppm la regulación canadiense, que es una de las más estrictas. Además, las concentraciones de As, Cd, Cu, Zn y Ag superan esta última norma por al menos 100 ppm.

Palabras Clave: Contaminación, Depósitos de Relave, Fondo Geoquímico, Normativa Ambiental, Drenaje Minero Ácido.

Agradecimientos: Los autores reconocen el apoyo brindado por el Laboratorio de Análisis de Sólidos (L.A.S-UNAB), por el acceso a su Instrumental de Análisis y por su colaboración profesional en el estudio realizado.

Referencias:

- Albanese S., De Vivo B., Lima A., Cicchella D. (2007). Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy) Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (ef) and geoaccumulation index (igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of geology & geophysics*, 5(1).
- Claussen, P., Zúñiga, E., Díaz, B., & Fernández, B. (2019). Plan nacional de depósitos de relaves para una minería sostenible. Cortés, I., Flores, A., Inostroza, N., Rebolledo, D., Martínez, J., Salinas, J., Riveros, C., & Brito, C. (2017). "Estudio de riesgo ambiental tranque de relaves las Palmas, comuna de Péncahue, Región del Maule".
- Fundación Chile. (2015). Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes.
- Gainza, V. (2014). Estimación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, en la cuenca del Maule, entre los 35,2° y 35,6°S. Universidad de Chile.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *En water research* (Vol. 14). Pgs Chile. (2018). "Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves".
- Pizarro, G., Pastén, P., Bonilla, C., Tarud, F., & Acevedo, S. (2010). Evaluación preliminar de contingencia en tranque de relaves Las Palmas, sector Péncahue, Región del Maule. Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves.
- SERNAGEOMIN. (2022). Geoquímica de superficie de depósitos de relaves de Chile.
- Yurisch, T. (2016). Situación de los pasivos ambientales mineros en Chile. El caso de los depósitos de relaves.

Caracterización del material de relave de la mina Escondida en Puerto Guadal y análisis de su dispersión hacia zonas aledañas por vías superficiales, región de Aysén, Chile

Marcia Paola Riquelme Galindo¹, Roberto Gómez Espina², Darío Gómez Duarte⁴, Javiera Gerding González³, Cristian Vera Soriano¹

(1) Universidad Andrés Bello, Escuela Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Autopista Concepción- Talcahuano 7100, Concepción, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(3) Universidad de Concepción, Instituto de Geología Económica Aplicada, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(4) Universidad Nacional de Asunción, Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario, Kilómetro 11, San Lorenzo, Paraguay

Los relaves de la mina Escondida de Puerto Guadal, conforman una de las zonas de desechos mineros abandonados de la región de Aysén (SERNAGEOMIN, 2020) y se plantea como un potencial problema ambiental, debido a la localización de los embalses en un alto topográfico, desde el que podría ocurrir su dispersión y contaminación hacia las zonas topográficamente más bajas.

Hasta 1998, esta mina explotaba principalmente sulfuros de Cu, Pb y Zn (Beros, 2005) pertenecientes a un yacimiento hidrotermal vetiforme asociado a los pórfidos riolíticos silicificados del Jurásico, emplazados en esquistos y filitas del Complejo Metamórfico Andino Oriental asignado al Devónico (De la Cruz y Suárez, 2006).

Para evaluar el potencial contaminante de los relaves, se preparó un modelo descriptivo del medio físico en base a un mapa topográfico siguiendo algunos de los lineamientos de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras (Gascon et al., 2015), y se diseñó un plan de muestreo en transectas orientadas hacia las posibles direcciones de flujo, es decir, hacia el NNW de la mina, y hacia el NW y NE del embalse de relave ubicado en la divisoria de aguas del alto topográfico. Además, se confeccionaron 10 colectores de sedimentos eólicos para instalar y monitorear en el trabajo de campo, similares a los propuestos por Wilson y Cooke (1980).

Las muestras de suelo y relaves recogidas se sometieron a análisis de pH en pasta, potencial de acidez neta o "Net AP" por sus siglas en inglés (Lawrence y Marchant, 1991), granulometría de acuerdo a la norma ASTM D-18 (2017) y digestión total para determinar la lectura de Cu, Pb, Zn y elementos potencialmente tóxicos asociados como; Al, Cd, Ca, Fe, Mn, Ni y As, mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP- MS). Las muestras contenidas en los colectores eólicos se basaron en una pesa ultrasensible y sus componentes minerales fueron analizados en una lupa binocular.

A partir de los resultados, se elaboró un mapa de distribución de concentraciones en el área estudiada y, se correlacionaron en una matriz lineal utilizando el coeficiente de Pearson (Hernández- Lalinde et al., 2018).

Se identificaron cuatro zonas de relaves distribuidas en laderas y altos topográficos con concentraciones sobresalientes de Cu, Pb, Zn y As, respecto a los límites internacionales permitidos para suelos agrícolas (Aguilar et al., 1999; Kabata- Pendias, 1995). El pH del medio es ácido y tiene potencial para generar Drenaje Ácido de Minas (DAM), calculándose la necesidad de 2,0 a 21,4 kg de CaCO₃ por tonelada de material para ser neutralizados.

El aporte sedimentario desde los relaves hacia los valles es evidente, destacando por la estrecha relación que existe entre la distribución de elementos como el Pb y As, cuyas concentraciones disminuyen aguas abajo, las concentraciones de Zn aumentan hacia dichos valles, y, la cantidad de matriz fina de las muestras disminuye aguas abajo. Por otro lado, las muestras con alto porcentaje de fracción fina presentan valores de pH bajos. Se determinaron dos direcciones de dispersión, una hacia el sector occidental del área estudiada que abarca hacia el NNW de la mina y al NW del embalse de relave que se encuentra en la divisoria de aguas. La otra dirección es el sector oriental del área, al NE del embalse de relave mencionado, donde se encuentra un cono aluvial que conecta con el valle del río Los Maquis. Tanto el embalse de relave del alto topográfico, como el cono aluvial, forman parte de un camino de ripio para el paso vehicular. De acuerdo a lo anterior, existe una mayor acumulación de As y Ni, en el sector oriental respecto al sector occidental, mientras que en este último hay una mayor acumulación de Zn y Pb. El Cu no presenta una tendencia clara.

Los resultados apuntan a que la escorrentía superficial es el principal mecanismo de transporte, y es potenciada por la removilización antrópica asociada a la actividad ganadera, turística y al paso vehicular sobre los embalses de relave y lecho del río Los Maquis, así como también, por acción biológica y eólica sobre los embalses de relave. La principal exposición de los seres vivos a estos contaminantes se debe a su presencia en suelos, sedimentos fluviales y aguas superficiales, pasando a la cadena trófica a través de la vegetación y potencialmente a animales ganaderos y humanos.

Palabras Clave: Relaves, Elementos potencialmente tóxicos, Drenaje Ácido de Minas, Colectores de sedimentos eólicos, Distribución de concentraciones.

Agradecimientos: Agradezco a mi familia por su incondicional apoyo, a mis amigos, profesores guía y comisión por aceptar formar parte de este proyecto y, a los encargados de laboratorio de la Universidad Andrés Bello.

Referencias:

- Aguilar, J., Dorronsoro, C., Gómez-Ariza, J., & Galán, E. (1999). Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación. Investigación y desarrollo medioambiental en Andalucía, 61-64.
- ASTM D-18. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1: ASTM International. Beros, M. M. (2005). De la Trapananda al Aysén: una mirada reflexiva sobre el acontecer de la Región de Aysén desde la prehistoria hasta nuestros días (Vol. 38): Pehuén Editores Limitada.

- De la Cruz, R., & Suárez, M. (2006). Geología del Área Puerto Guadal-Puerto Sánchez escala 1: 1.000. 000. Carta Geológica de Chile, 95.
- Gascon, R., Soto, M., Oblasser, A., Calderón Rosa, C., Hoppe, J., Salazar, N., Guala, C. (2015). Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.
- Hernández-Lalinde, J., Espinosa-Castro, J.-F., Penaloza-Tarazona, M.-E., Díaz-Camargo, É., Bautista-Sandoval, M., Riaño-Garzón, M. E., Bermúdez-Pirela, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: verificación de supuestos mediante un ejemplo aplicado a las ciencias de la salud. Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 37(5), 552-561.
- Kabata-Pendias, A. (1995). Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils Heavy metals (pp. 3-18): Springer.
- Lawrence, R., & Marchant, P. (1991). Acid rock drainage prediction manual. MEND/NEDEM Report, 1.
- SERNAGEOMIN. (2020). Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 10-08-2020) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Depósitos de Relaves, (Santiago, Chile ed.): Santiago, Chile.
- Wilson, S., & Cooke, R. (1980). Wind erosion. Soil erosion, 217251.

Análisis Geoquímico de Suelos Urbanos de la Ciudad de Santiago de Chile: Impactos del Estallido Social

Javiera Salgado Ibáñez¹, Ana Valdés Durán², Christian Creixell Torres³

(1) Universidad de Chile, Química, Ciencias, Las Palmeras 3425, Ñuñoa, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología General, Plan Nacional de Geología, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

Introducción

En las últimas décadas, los estudios de geoquímica ambiental de suelos urbanos (Albanese & Breward, 2011; De Miguel et al., 2002; Le Guern, 2017) han incrementado debido a la importancia que tienen en la evaluación ambiental de entornos poblacionales. Para este tipo de estudios, la elaboración de líneas base son muy importantes debido a la distribución espacial dentro de un área de interés, así como los posibles orígenes de los elementos a analizar. En Chile, existe un déficit importante en la caracterización de suelos urbanos dado que la mayoría de los estudios se centran en zonas rurales/peri rurales (Tapia et al., 2015). Los únicos estudios sistemáticos con respecto a la generación de líneas base sobre geoquímica ambiental se enmarcan en el Plan Nacional de Geología (PNG) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), haciendo referencia principalmente a sedimentos y no necesariamente a suelos. De acuerdo a lo anterior y dada la importancia que tiene el suelo, surge la necesidad de elaborar líneas base de geoquímica ambiental de suelos que permitan conocer el estado del mismo y contar con las directrices que posibiliten la toma de decisiones respecto a ello.

Por otra parte, a nivel normativo, Chile actualmente no posee criterios definidos para la calidad de suelos a nivel nacional, que establezcan las concentraciones límite para elementos potencialmente contaminantes, lo que imposibilita -en términos legales- referirse al término contaminación, ya que, de acuerdo a la Ley 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (MINSEGPRES, 1994), el término está asociado a la superación de límites establecidos en la legislación vigente. Sin embargo, de acuerdo al art. 11 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA), es posible utilizar como referencia normas de calidad ambiental y de emisión de los países que allí se enlistan, de acuerdo a la similitud de los componentes ambientales y situación nacional y/o local, siendo justificado razonablemente por el proponente (MINSEGPRES, 1994).

En este contexto, surge la necesidad de caracterizar geoquímicamente aquellos suelos presentes en zonas urbanas del territorio nacional para así tener un conocimiento más acabado sobre aquellos elementos químicos que potencialmente pueden impactar de manera negativa en la funcionalidad de las distintas matrices ambientales, pudiendo incluso generar la degradación del medio circundante. Es importante enfatizar en que el conocimiento que se adquiere con esta información es necesario para prevenir cualquier problema asociado al corto, mediano y/o largo plazo (Aliaga, 2016), pues algunos metales y metaloides suponen riesgos potenciales en la naturaleza y en la sociedad dado que generan serios problemas en la salud humana y animal (Waisberg et al., 2003).

En concreto, este estudio busca contribuir al desarrollo y generación de líneas base de geoquímica urbana con el fin de lograr un mayor entendimiento de los procesos dinámicos que pueden producirse por fenómenos naturales o antrópicos. El objetivo general del presente estudio es elaborar y comparar líneas de base geoquímicas de suelos urbanos, correspondientes a los años 2020 y 2021 y, de este modo evaluar la degradación ambiental que pudieron haber sufrido los suelos circundantes a las zonas que, durante el último trimestre del 2019, en el contexto del estallido social, sufrieron un impacto sostenido del uso de agentes antidisturbios. Los elementos analizados en el presente trabajo fueron As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, contenidos en suelos de un área de estudio que abarca parte de las comunas de Santiago Centro, Providencia, Ñuñoa y Recoleta.

Metodología

La metodología desarrollada consistió, en primera instancia, en la toma de muestras de suelo (profundidad 0-5 cm), desarrollada en dos campañas de muestreo, la primera entre enero y febrero de 2020 y la segunda entre noviembre y diciembre de 2021, con 36 y 54 muestras colectadas, respectivamente. La toma de estas muestras se realizó según el protocolo de muestreo del Atlas Geoquímico Europeo (Salminen et al., 1998) para zonas urbanas (mayor densidad de muestreo), utilizando una grilla de muestreo de 0,5 x 0,5 km², propuesta por Reimann et al. (2008). El área de estudio se encuentra localizada en la zona centro-norte de la Región Metropolitana, con superficie aproximada de 8,8 km² (Figura 1).

Posteriormente, se llevó a cabo un pretratamiento de las muestras, el cual consistió en un tamizaje a 2 mm y posterior cuarteo para efectuar la determinación de los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad eléctrica (CE) de acuerdo a las metodologías descritas por Sadzawka et al. (2006). Seguidamente, se procedió a tamizar las muestras de suelo a 63 µm para poder llevar a cabo la cuantificación de los elementos mediante plasma acoplado inductivamente con detector de masa (ICP-MS), para lo cual previamente se realizó una digestión ácida, requerida para la eliminación de la materia orgánica contenida en las muestras.

Lo anterior, permitió llevar a cabo la elaboración de una línea base que consideró las siguientes etapas: i) tratamiento estadístico (validación de base de datos, construcción de boxplots (diagramas de caja y bigote) haciendo posible la identificación de muestras "outliers" y determinación de *background*) y ii) distribución espacial mediante la metodología de interpolación Multilevel b-spline interpolation utilizando el Sistema de Información Geográfica de software libre, QGIS.

Respecto al primer punto, es importante mencionar que la detección y determinación de los datos anómalos es uno de los principales objetivos del análisis estadístico de datos geoquímicos, ya que éstos, desde el punto de vista ambiental, corresponden a eventos contaminantes extremos, que deben ser considerados. Por esta razón es que se realiza una normalización de los datos para así cons-

truir los llamados diagramas de caja y bigote y poder visualizar de mejor manera la distribución estadística de estos datos, identificando el intervalo en donde se encuentran los datos centrales ("normales") y aquellos que se encuentran fuera del mismo, superando los límites establecidos, determinados como bigotes superior (BS) e inferior (BI), constituyendo las denominadas anomalías geoquímicas positivas y negativas, respectivamente.

En una etapa posterior, se determinó el grado de contaminación (mCd), el cual fue calculado considerando el tratamiento estadístico previo y la determinación de los valores background correspondientes a los elementos analizados, para finalmente comparar los valores obtenidos con normativa internacional Canadiense.



Figura 1. Distribución de muestras en el área de estudio de acuerdo con lo descrito por Reimann et al. (2008) para muestreo de zonas urbanas. (Figura elaborada por Javier Álvarez, Servicio Nacional de Geología y Minería, 2020).

Resultados

El pH de la mayoría de las muestras analizadas, tanto para las del año 2020 como para las del 2021, presentó un valor entre 6,5 y 7,5, indicativo de suelos principalmente neutros. Por otra parte, con respecto a la conductividad eléctrica, fue posible evidenciar una diferencia notable entre los valores obtenidos entre los años 2020 y 2021, siendo los del primer año considerablemente mayores que los del segundo, especialmente en sitios ubicados en el sector noreste del área de estudio, alcanzando valores superiores a los 6 dS/m.

Una vez determinados los parámetros fisicoquímicos, se llevó a cabo la elaboración de la línea base, de acuerdo al tratamiento estadístico y el análisis boxplot de los datos, posibilitando la determinación de los valores *background* para los elementos As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, correspondientes a 18,7; 4,86; 248; 34,6; 20,5; 53 y 264 mg/kg, respectivamente.

Asimismo, con el tratamiento estadístico previo de los datos, fue posible determinar la distribución de las concentraciones en los distintos puntos muestreados y su respectiva interpolación en el área de estudio, complementada con la representación del background mediante histogramas y los diagramas de caja y bigote.

Con respecto al primer elemento perteneciente al grupo de los elementos potencialmente dañinos (PHEs), el Arsénico, de acuerdo a los resultados obtenidos, fue posible identificar una acumulación del mismo en casi la totalidad del área de estudio en el año 2020. Sin embargo, en el año 2021, se evidenció una considerable disminución (65,4%) respecto al año anterior. Asimismo, de acuerdo al análisis box-plot, el valor correspondiente al bigote superior (BS) para este elemento corresponde a 38 mg/kg, indicativo de un total de 22 sitios con anomalías geoquímicas positivas para el año 2020 y 2 para el año 2021.

Para el caso del Cadmio, en general la distribución de las concentraciones entre un año y otro fue prácticamente igual, siendo el valor máximo igual a 14 mg/kg en 2020 y 14,3 mg/kg en 2021. A pesar de esto último, se aprecia una disminución de un 5,8% en las concentraciones del año 2021, especialmente en el sector norte del área de estudio. Por otra parte, de acuerdo a la determinación de su correspondiente BS, fue posible identificar un total de 0 sitios con anomalías geoquímicas positivas. No obstante, es posible apreciar un total de 8 sitios con anomalías geoquímicas negativas para el año 2020 y un total de 7 para el año 2021, lo cual estaría indicando sitios con concentraciones bajo el rango “normal” de concentraciones para este elemento.

Con respecto al cobre, éste sigue la misma tendencia que el arsénico, ya que se aprecia una distribución muy generalizada de las concentraciones de Cu en 2020, sin embargo, en el año 2021 es posible apreciar una considerable disminución (12,9%) en las concentraciones en casi la totalidad del área de estudio. Asimismo, de acuerdo a la elaboración de su correspondiente box-plot, fue posible determinar que el BS para este elemento corresponde a 874 mg/kg, lo cual hace posible la identificación de un total de 8 sitios con anomalías geoquímicas positivas en el año 2020 y solo 3 para el año 2021.

Siguiendo con la lista de los elementos PHEs, se encuentra el cromo, para el cual las concentraciones más altas se evidenciaron en el sector noreste del área de estudio en el año 2020, presentando una considerable disminución de las mismas en el año 2021 (41,9%). Igualmente, de acuerdo a la determinación del BS, fue posible identificar un total de 15 sitios anómalos positivos para dicho año, sin embargo, en el año 2021 sólo se identificó un sitio anómalo, correspondiente al sitio STGO21-1.

Las concentraciones de níquel fueron considerablemente mayores en el año 2020 y éstas se extendieron por prácticamente toda el área de estudio, presentando un total de 30 de los 36 sitios muestreados con anomalías geoquímicas positivas, dado su BS (45,8 mg/kg). Por otra parte en el año 2021 a pesar de que las concentraciones fueron significativamente menores, el valor máximo neto de las concentraciones se presentó en dicho año, alcanzando un valor igual a 191 mg/kg, aun así, el total de sitios con concentraciones anómalas positivas solo asciende a 3.

Ahora bien, el plomo presentó concentraciones considerablemente mayores al BS (294 mg/kg) definido para este elemento en el año 2020, pudiendo establecerse un total de 12 sitios con anomalías geoquímicas positivas, los cuales presentaron concentraciones de Pb superiores a 1000 mg/kg. En el año 2021 se presentó una disminución notable en algunos sitios del área de estudio, evidenciándose incluso 4 sitios con anomalías geoquímicas negativas.

Finalmente, para el caso del zinc, este no varió el comportamiento respecto a los elementos anteriormente mencionados. Las concentraciones de este elemento fueron considerablemente mayores en el año 2020, presentándose una disminución de las mismas en el año 2021 igual a un 26,6%. Asimismo, de acuerdo a la determinación de su correspondiente BS, fue posible establecer un total de 5 sitios anómalos positivos para el año 2020 y 3 para el año 2021.

Grados de contaminación en el área de estudio

Eventualmente, con la correspondiente distribución espacial de las concentraciones en el área de estudio fue posible determinar y establecer el grado de contaminación (mCd) para cada uno de los sitios analizados. En general no se apreciaron diferencias considerables entre un año y otro respecto a este indicador de contaminación, sin embargo el sitio STGO20-14 superó considerablemente dicho índice en cualquiera de los sitios analizados, alcanzando un valor igual a 372,32, indicativo de un grado de contaminación alto.

Asimismo, la cuantificación de las concentraciones de los elementos analizados permitió realizar la comparación de dichos valores con límites máximos definidos en normativa Canadiense para suelos residenciales, comerciales e industriales, en donde fue posible establecer que la totalidad de los elementos sobrepasa en algún porcentaje los límites establecidos por dicho país.

Discusión

De acuerdo a todos los resultados obtenidos, fue posible establecer una tendencia general en donde existió una disminución de las concentraciones de los elementos analizados hacia el año 2021, de un 65,4%, 5,8%, 41,9%, 12,9%, 25,7%, 49% y 26,6%, para As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, respectivamente.

De la misma forma, es importante destacar que la distribución de las concentraciones de los elementos analizados se presentó mayoritariamente en el sector noreste del área de estudio en el año 2020, al igual que lo que se evidenció en los resultados de la conductividad eléctrica. Para justificar los altos valores de los distintos parámetros analizados en este estudio, sobre todo en el año 2020, es importante destacar el contexto social en el que se encontraba Chile previo a la toma de muestras, el Estallido Social, el cual se extendió de octubre del 2019 a enero del 2020 aproximadamente. En dicho contexto la intervención antrópica fue considerablemente alta, sobre todo por el uso y abuso de agentes antidisturbios. Respecto a lo último, un estudio realizado por Forensic Architecture (2020) modeló la nube de contaminación de estos agentes antidisturbios utilizados en este período, evidenciando un transporte de éstos, debido a la direccionalidad de los vientos, hacia el sector noreste de Plaza Italia, en donde coincidentemente se registraron, en general, los valores más altos de los parámetros medidos, lo que estaría justificando en gran parte el nivel de intervención y enriquecimiento en dicho sector. Lo anterior también se evidencia de acuerdo a los resultados obtenidos para el índice de contaminación, el cual, como se mencionó anteriormente, presentó un valor máximo en el sitio STGO20-14, siendo justamente el sitio más cercano a Plaza Italia (o Plaza Dignidad después del estallido social). También es importante destacar fenómenos meteorológicos, referido al déficit de precipitaciones, que en el año 2019 alcanzó más de un 80%, pudiendo estar afectando la distribución de estos elementos, junto con el nuevo contexto social mundial, la pandemia por Covid-19, en el cual se aplicaron estrictas restricciones de movilidad desde marzo (2020) a septiembre (2021), contribuyendo así en la disminución de agentes externos al sistema suelo.

Conclusiones

Con los antecedentes anteriores fue posible identificar una acumulación de las concentraciones de los elementos analizados y parámetros fisicoquímicos como la CE en el año 2020, concluyendo que la totalidad de las variables analizadas convergen y se respaldan entre sí, indicando un alto grado de intervención antrópica evidenciado en dicho año. Asimismo, es importante destacar que los parámetros y variables analizadas presentaron altas concentraciones específicamente en la zona N y NE del área de estudio y los alrededores de Plaza Dignidad, información que fue contrastada con el cálculo del grado de contaminación, obteniéndose un valor significativamente alto (372,32) en dicho sitio, además de los antecedentes expuestos en el estudio de Forensic Architecture, en donde se modeló la nube de contaminación asociada a la utilización de agentes antidisturbios utilizados en el Estallido Social, evidenciada en el sector NE de plaza Dignidad.

Asimismo, fue posible identificar una considerable disminución en las concentraciones de los elementos y variables analizadas en el año 2021, asociados a las restricciones de movilidad asociados a la Pandemia por Covid-19, eventos meteorológicos y a los procesos dinámicos propios de la matriz suelo.

Finalmente, de acuerdo a la comparación de las concentraciones obtenidas con los límites máximos establecidos por la norma canadiense, es posible concluir que la totalidad de los elementos PHEs superan por lo menos un parámetro de los establecidos en dicha norma.

Palabras Clave: anomalía geoquímica, background geoquímico, línea base geoquímica.

Agradecimientos: Javier Álvarez, Felipe Barrientos, Alejandra Canales, Daniela Calderón, España Madriaza, Roberto Merino González, Ismael Murillo Rogers, Luis Navarro Frez, Matías Peña Gómez, Daniela Villela.

Referencias:

- Albanese, S., & Breward, N. (2011). Sources of Anthropogenic Contaminants in the Urban Environment.
- Aliaga, G. (2016). Caracterización Geoquímica de los suelos de la cuenca de Rancagua (34°S-34°15'S y 70°30'O-71°O). Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Universidad de Chile.
- De Miguel, E., Llamas, J. F., Chacón, E., Fernández Arrojo, C., Ordóñez, A., Caballa, A., Larssen, S., & Charlesworth, S. (2002). Caracterización geoquímica de los ciclos de elementos trazas en ambientes urbanos. *Boletín Geológico y Minero*, 35–43.
- Forensic Architecture. (2020). Gas Lacrimógeno en Plaza Dignidad.
- Le Guern, C. (2017). Urban Geochemistry: From 2D to 3D. *Procedia Engineering*, 209, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.126>.
- MINSEGPRES, M. S. G. de la P. (1994). Ley 19300 - APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. <https://bcn.cl/32lk3>.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R., & Dutter, R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. John Wiley & Sons.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. D. L. L., Flores, H., & Neaman, A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F. M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J. O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'connor, P., Odor, L., Ottonello, G., ... Van Der Sluys, J. (1998). *Foregs Geochemical Mapping Field Manual*. Geologian Tutkimuskeskus, Opas - Geological Survey of Finland, Guide 47.
- Tapia, J., Mulet, J., Poblete, N., & Rodríguez, C. (2015). Catastro de estudios de geoquímica ambiental de suelos y sedimentos de Chile.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. In *Toxicology* (Vol. 192, Issues 2–3, pp. 95–117). Elsevier Ireland Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00305-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00305-6).

REE en suelos de Santiago de Chile en Contexto de Estallido Social

Javiera Salgado Ibáñez¹, Ana Valdés Durán², Christian Creixell Torres³

(1) Universidad de Chile, Química, Ciencias, Las Palmeras 3425, Ñuñoa, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Plan de Nacional de Geología, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

El presente estudio de Geoquímica Ambiental de Suelos Urbanos tuvo lugar en cuatro comunas de la zona centro-norte de la Región Metropolitana; Providencia, Ñuñoa, Recoleta y Santiago Centro. Se colectaron un total de 90 muestras entre los meses de enero-febrero de 2020 y noviembre-diciembre de 2021 con el fin de caracterizar químicamente los suelos, establecer una comparación entre ambos años de estudio y así evaluar el impacto de la contaminación desde las diversas fuentes asociadas a los acontecimientos ocurridos entre octubre-diciembre 2019 y otras fuentes pre-existentes. Los elementos analizados y validados corresponden a las tierras raras Ce, Dy, Er, Gd, La, Nd, Pr, Sc, Sm, Y e Yb, las cuales fueron cuantificadas mediante Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) en la Comisión Chilena de Energía Nuclear. La cuantificación de la concentración de estos elementos permitió la elaboración de una línea base que consideró las siguientes etapas: i) tratamiento estadístico (validación de datos, construcción de box-plots identificando muestras "outliers" y determinación de *background*) y ii) distribución espacial mediante la metodología de interpolación *Multilevel b-spline interpolation* utilizando el Sistema de Información Geográfico de software libre, QGIS. A partir de estos resultados se realizó un análisis de fuentes de acuerdo con antecedentes bibliográficos y conforme a la distribución de las concentraciones de las variables analizadas, según criterios geográficos y clima. Los resultados principales indican una notable disminución en las concentraciones de los elementos hacia el año 2021, con respecto al año 2020. Por otra parte, la distribución espacial de las concentraciones de la mayoría de los elementos pertenecientes al grupo de tierras raras se presenta de manera tendencial en el sector norte del área de estudio, en donde, en general, se registra la concentración más alta en el sitio de muestreo STGO20-14, que corresponde al punto más cercano al sector de Plaza Italia, comuna de Providencia. Asimismo, es importante recalcar el contexto social en el cual se presentaba en Chile a fines del año 2019 e inicios del 2020 respecto al Estallido Social, que de acuerdo a antecedentes obtenidos de un estudio realizado por Forensic Architecture sobre la nube de contaminación de los agentes antidisturbios utilizados en dicho contexto, es posible establecer una correlación entre dicha nube y el sector que se encontraría más enriquecido por estos elementos. Además, de acuerdo a bibliografía, una de las principales fuentes antropogénicas de tierras raras se encuentra asociada a las emisiones por los vehículos motorizados y, de acuerdo a un catastro realizado en 2020, el principal flujo vehicular se registra en la zona aledaña a Plaza Italia, lo que en cierta medida, estaría justificando los altos valores de concentración en dicho sitio.

Palabras Clave: background geoquímico, línea base geoquímica, anomalía geoquímica

Agradecimientos: Javier Álvarez, Felipe Barrientos, Alejandra Canales, Daniela Calderón, España Madriaza, Roberto Merino González, Ismael Murillo Rogers, Luis Navarro Frez, Matías Peña Gómez, Daniela Villela.

Contaminantes ambientales en la zona de sacrificio de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile

Camilo Sánchez¹⁻²⁻³, Álvaro Navarrete¹⁻²

(1) Universidad Mayor, Escuela de geología, Facultad de ciencias, Ingeniería y tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Cobrizo Geología Ambiental, Linares, Chile

(3) GEMA Center for Genomics, Ecology & Environment, Universidad Mayor, Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago, Chile

En la localidad de Ventanas, Puchuncaví, región de Valparaíso; se encuentra emplazado uno de los principales centros industriales de Chile central, albergando industrias energéticas, marítimas, químicas y de procesamiento de minerales cupríferos e hidrocarburos. Este comenzó sus operaciones en 1958 y se ha mantenido hasta la actualidad. La alta cantidad de industrias en la zona ha generado eventos de contaminación severos de forma periódica, los que han afectado a las y los residentes de las localidades colindantes, principalmente por las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Entre los productos generados se encuentran los botaderos de escoria de procesos mineros en los humedales urbanos de la comuna, junto con una alta emisión de contaminantes sulfurados a través de chimeneas de procesos metalúrgicos. También se han registrado concentraciones de metales y metaloides como cobre, zinc, arsénico y plomo, tanto en agua, sedimento y biota; así como también concentraciones de contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos.

El conjunto de características composicionales registradas en la zona de estudio genera un gran riesgo al ecosistema, afectando la calidad ambiental de suelos, agua, atmósfera y organismos vivos; caracterizando a la zona de Puchuncaví como uno de los lugares más contaminados en Chile. A pesar de esto, aún se desconoce la dinámica integrada de contaminantes en los sistemas naturales, su origen, distribución y formas de incorporación en las distintas matrices donde se han reconocido. Es por esto que en esta investigación se plantea que las fases sólidas de los sistemas naturales de Puchuncaví han grabado de forma temporal y espacial el aporte de contaminantes en los últimos 20 años, específicamente para metales, metaloides e hidrocarburos.

Para desarrollar esta investigación, se analizaron los datos publicados por el Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL) de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante de la Armada de Chile (DIRECTEMAR); junto con muestras obtenidas de campañas de muestreo entre los años 2021-2022. En particular, se realizaron evoluciones temporales en la matriz agua de mar, sedimentos y biota; así como también se incorporaron análisis composicionales de muestras de los Humedales Campiche-Los Maitenes y muestras de suelos urbanos. Con estos antecedentes, se modeló la distribución de contaminantes, en particular para Arsénico, Mercurio, Cadmio, Azufre e Hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Las conclusiones de este estudio proveerán antecedentes específicos del grado de afectación de los ecosistemas, así como también del nivel de riesgo ecológico según los contaminantes estudiados.

Palabras Clave: Contaminación, Puchuncaví, Metales prioritarios.

Presencia de contaminantes en la península Antártica. Influencia antrópica en la ocurrencia y características de especies inorgánicas y contaminantes orgánicos persistentes

Camilo Sánchez¹⁻²⁻⁴, Cristóbal Galbán²⁻³

- (1) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile
(2) Universidad Mayor, GEMA Center for Genomics, Ecology & Environment, Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago, Chile
(3) Florida International University, Institute of Environment, Miami, FL 33199, Miami, USA
(4) Cobrizo Geología Ambiental, Linares, Chile

Los contaminantes en sistemas naturales pueden ser de características orgánicas e inorgánicas, dependiendo de los atributos naturales de una localidad o del aporte antrópico asociado. En este sentido, existen contaminantes con una distribución de corta distancia y de larga distancia, alcanzando incluso regiones antárticas. Estos contaminantes suelen ser transportados por distintos medios, como las corrientes de viento, agua y sedimento. Entre estos se destacan los Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs) cuya distribución ha alcanzado escalas globales, por lo que han debido ser regulados por convenciones internacionales. Es por esto que es de particular interés conocer las formas de transporte, fijación y removilización de los POPs en ambientes antárticos, con la finalidad de comprender las posibles afectaciones ambientales, ecológicas y cómo se distribuyen en distintas fases inorgánicas.

El transporte y deposición de los POPs puede verse favorecido por las condiciones ambientales, como en zonas antárticas donde las bajas temperaturas favorecen su fijación al suelo, nieve y superficie de agua. En particular, en la columna de agua se pueden mantener en la fase disuelta, precipitar en una fase mineral o volatilizarse; incluso pueden ser incorporadas por organismos a las tramas tróficas ya que son lipofílicos. Además, los POPs no se degradan en condiciones ambientales, por lo que se fijan a distintas superficies dependiendo de las condiciones ambientales e incluso pueden removilizarse de superficies de deposición. Este punto cobra particular interés en un contexto de cambio climático, en donde los POPs fijados sobre el permafrost podría convertirse en una fuente secundaria de contaminantes.

Esta investigación en curso considera el análisis de los datos obtenidos en campañas de muestreo del período 2022-2023 para muestras de aire, agua, biota y sedimento; y la definición de presencia y concentración de POPs. Se considera la realización de modelos de fugacidad para definir variaciones de deposición en fases inorgánicas, así como también caracterizaciones fisicoquímicas del medio acuoso.

Las conclusiones de este trabajo permitirán conocer los mecanismos de partición de contaminantes orgánicos persistentes en distintas fases de ambientes antárticos en un contexto de cambio climático. Además, los resultados de esta investigación permitirán comprender los efectos permanentes a nivel global de la actividad antrópica.

Palabras Clave: contaminación, Antártica, contaminantes orgánicos persistentes, cambio climático.

Financiamiento: Esta investigación es financiada por el proyecto FONDECYT Regular 1210946 año 2021.

Contaminantes antropogénicos y geogénicos en cuencas localizadas a distintas latitudes de Chile

Joseline Tapia¹⁻², María Pía Rodríguez Montecinos³⁻⁴, Cristina Ortega Caurapan⁵

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - CKELAR Volcanes, Antofagasta, Chile

(3) Universidad de Atacama, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Copiapó, Chile

(4) Universidad Nacional Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería

(5) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Facultad de Ciencia, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

Chile se localiza en el borde sur-occidental de Sudamérica y presenta una gran distribución latitudinal. Debido a esta gran extensión, el país presenta: (i) diversos afloramientos geológicos, los que se relacionan en gran medida con los productos volcánicos emitidos por la Cordillera de Los Andes, (ii) diversidad metalogénica y los residuos de la explotación de diversos depósitos minerales, y (iii) una gran variabilidad climática. En la zona norte del país, los productos volcánicos se correlacionan con la Zona Volcánica Central (CVZ), en la que se observa engrosamiento y contaminación cortical. En tanto el centro y centro-sur del país se encuentran relacionados a la Zona Volcánica Sur (SVZ), que presenta menor espesor cortical y magmatismo bimodal (Stern, 2004).

Debido a esta gran variabilidad geológica y climática, y con el objetivo de investigar potenciales contaminantes inorgánicos en diversas latitudes de Chile: arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), molibdeno (Mo), plomo (Pb) y antimonio (Sb) fueron investigados tanto en agua como sedimento entre los años 2016 y 2021 en cuatro transectas que se expanden entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes localizadas en las Regiones de Arica y Parinacota (APR), Atacama (AR), Metropolitana (MR), y Los Ríos (LRR) durante invierno y verano. Las muestras de agua fueron filtradas (utilizando jeringas y filtro-jeringa descartable de 0,22 μm de diámetro) y acidificadas (HNO_3 ultrapuro) en terreno. Las muestras de sedimento fueron secadas a 50°C, tamizadas a tamaño limo-arcilla (< 63 μm) digeridas con agua regia inversa (300 mg muestra + 4 mL HCl + 12 mL HNO_3). Las concentraciones elementales en aguas fueron medidas utilizando un espectrómetro de masas (ICP-MS) y las concentraciones de los sedimentos digeridos fueron analizadas utilizando ICP-MS u espectrómetro óptico (ICP-OES).

Los principales resultados de esta investigación indican que As se encuentra enriquecido en los sedimentos de todas las transectas estudiadas al compararlo con las concentraciones promedio de la corteza continental superior (UCC); sin embargo, las transectas del norte de Chile son las que presentan las concentraciones más anómalas, tanto en aguas como sedimento (Tapia et al., 2022). Estos valores podrían estar correlacionados con el mayor engrosamiento cortical de esta zona, la presencia de rocas félsicas y la ocurrencia de fallas corticales activas. A pesar de las concentraciones elevadas de este elemento, su origen se propone principalmente como geogénico y relacionado al volcanismo de Los Andes. Otros elementos que mostraron principalmente un origen geogénico en los sedimentos y aguas muestreados corresponden a Cd, Pb, Co y Cr, estos elementos presentan en general concentraciones similares a las de la corteza continental superior o a la de aguas fluviales. Sin embargo, Co y Cr presentan un aumento de las concentraciones en sedimentos de la zona centro-sur del país, lo que se propone estar relacionado a la presencia de rocas ultramáficas en la *Serie Metamórfica Occidental*. Los elementos Sb, Mo y Cu, son los que presentarían mayor influencia antropogénica, ya que las mayores concentraciones de estos elementos se observan en el transcurso del Río el Salado, en la Región de Atacama, el que presenta numerosos relaves y actividades mineras en las cercanías. En este sector los sedimentos que se presentan en la cuenca de El Salado Bajo son los que presentan las mayores concentraciones de Cu $\pm$ Mo $\pm$ Sb, lo que coincide espacialmente con las minas de El Salvador y Potrerillos.

Los resultados y conclusiones de esta investigación podrían representar uno de los primeros pasos para trabajar en una legislación ambiental para sedimentos en Chile basada en las características geológicas de distintas latitudes y condiciones hidrometeorológicas del país.

Palabras Clave: Inorganic contaminants, central volcanic zone, arsenic, mining, climate.

Financiamiento: Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt de Iniciación en Investigación 11180090 de la Agencian Nacional de Investigación ANID.

Agradecimientos: Agradecemos a C. Lagomarsino, C. Quiroz, B. Jones, B. Sepúlveda, C. Urra, S. Villagrán., M. Ildefonso, F. Remonsellez y M. Bravo quienes colaboraron en salidas a terreno y/o análisis químicos.

Referencias:

- Stern, 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, No. 2, p. 161-206.
- Tapia et al. 2022. Role of tectonics and climate on elevated arsenic in fluvial systems: Insights from surface water and sediments along regional transects of Chile. *Environmental Pollution*, 314, 120151.

Movilidad de arsénico, cobre y zinc en zonas impactadas por diversas actividades industriales en el norte y centro de Chile

Joseline Tapia¹, Paris Lavin³, Jorge Valdés²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad de Antofagasta, Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt, Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Biológicos, Av. Angamos 601, Antofagasta, Chile

(3) Universidad de Antofagasta, Departamento de Biotecnología, Laboratorio de Ecología Funcional, Instituto Antofagasta, Campus Coloso, Antofagasta, Antofagasta

Diversas actividades industriales desarrolladas a lo largo de Chile han dado lugar a lo que se conoce como zonas de sacrificio ambiental. Algunas zonas de sacrificio corresponden a Tocopilla, Mejillones en el norte del país, Huasco en el centro-norte, Ventanas en la zona central y Coronel en el centro-sur del país.

Para comprender el comportamiento de algunos elementos que se relacionan a las emisiones de actividades industriales realizadas en diversas áreas de Chile, se estudiaron las concentraciones totales y parciales de arsénico (As), cobre (Cu) y zinc (Zn) en muestras de suelo y polvo. El muestreo se realizó en las localidades de Tocopilla y Antofagasta en la zona norte de Chile y de Las Tórtolas, Polpaico y Ventanas en la zona central de Chile. En cada uno de estos sitios se midió pH, conductividad y temperatura del suelo. Las muestras de suelo y polvo fueron secadas a 50°C y tamizadas a malla #230 (<63 µm). Posteriormente las muestras fueron digeridas con agua regia inversa (300 mg muestra + 4 mL HCL + 12 mL HNO₃) utilizando un digestor microondas por 15 minutos para obtener el contenido metálico total (CMT) en el Centro de Estudio del Agua en el Desierto (CEITSAZA). Posteriormente, las muestras, tanto de suelo como de polvo fueron digeridas utilizando digestiones secuenciales para inferir las fracciones más lábiles o intercambiables (F1; 4 mL MgCl₂ + 200 mg muestra y agitación continua por 1 h), fracciones relacionadas con carbonatos (F2; 10 mL solución de acetato + 500 mg muestra a pH 5 con ácido acético), fracciones asociadas con oxihidróxidos amorfos de Fe y Mn (solución de ascorbato + 200 mg muestra + agitación por 24 h), fracción de metales asociados con materia orgánica y/o sulfuros amorfos (H₂O₂ + 200 mg muestra) y la fracción residual (o no móvil) en los ambientes superficiales (F5 = CMT - (F1 + F2 + F3 + F4); Tessier et al., 1979). Finalmente, algunas muestras de suelo y polvo fueron sometidas a un test de bioaccesibilidad simplificado (SBET; 500 mg muestra + 50 mL glicina + HCl para lograr pH 1,5) y una digestión estomacal basada en fisiología (PBET; 400 mg muestra + 1,25 g pepsina + 0,5 g citrato + 0,5 g malato + 420 mL ácido láctico + 500 mL ácido acético; Sialelli et al., 2010).

Los resultados preliminares de esta investigación muestran que los suelos de Tocopilla (7,28), Antofagasta (7,64), Las Tórtolas (7,01) y Polpaico (7,41) tienen pH circumneutral, en tanto, los suelos de Ventanas son circumneutrales a levemente ácidos (6,32). Los suelos de Tocopilla y Antofagasta y son levemente oxidantes (184 y 154 mV, respectivamente); en tanto los suelos de Las Tórtolas, Colina y Ventanas son oxidantes (283, 285 y 314 mV, respectivamente). Con respecto a la movilidad de estos elementos, el mayor porcentaje de Cu, Zn y As en suelos se presenta en estado residual; sin embargo, As es el elemento que muestra el mayor porcentaje de movilidad de los elementos estudiados. Los análisis de polvo, muestran que el mayor porcentaje de Cu (86%), As (62%) y Zn (55%) se presenta en estado residual en Tocopilla, en tanto en el polvo de Antofagasta un 72% de Zn, 64% de Cu y 61% de As, también se presentan en estado residual. Ambos tipos de digestiones estomacales en muestras de polvo indican que Cu es el metal con menos potencial de bioaccesibilidad (7% a 8% en Antofagasta y 12% a 13% en Tocopilla), en tanto Zn (41% a 43% en Antofagasta y 37% a 45% en Tocopilla) y As (47% a 51% en Antofagasta y 29% a 33% en Tocopilla) en polvo presentan mayor potencial de ser digeridos estomacalmente. Los resultados de digestiones estomacales y secuenciales para el polvo de la zona central están siendo procesados.

Los resultados preliminares de esta investigación indican que existen diferencias en el potencial de movilización y de bioaccesibilidad en los suelos y polvos asociados con distintos tipos de actividades industriales de Chile.

Palabras Clave: Tocopilla, Zona de sacrificio ambiental, Minería, Contaminación, Movilidad elemental.

Financiamiento: Fondecyt Regular 1200390.

Agradecimientos: Esta investigación se ha realizado gracias al apoyo de Daniela García, Joaquín Aguilera, Yasna Marambio y Maritza Malebrán.

Referencias:

- Sialelli et al. 2010. Use of a physiologically based extraction test to estimate the human bioaccessibility of potentially toxic elements in urban soils from the city of Glasgow, UK. *Environ Geochem Health*.
- Tessier et al. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51 (7), 844-851.

Mediciones continuas de los niveles de concentración de metales pesados en el material particulado atmosférico de la ciudad de Calama

Richard Toro Araya¹, Manuel Leiva-Guzmán¹, Ana Valdés Durán², Luis Felipe Sánchez Puentes¹, Tomás Claramunt Ancavil¹, Luis Navarro Frez¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Las Palmeras 3425, Santiago, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, División de Investigación, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, Nueva Bilbao 12501, Santiago, Chile

Las mediciones de metales pesados en el material particulado (MP) se han realizado históricamente mediante técnicas tradicionales (discontinuas, fuera de línea) que requieren de una gran cantidad de recursos y trabajo en terreno para la obtención de muestras y en el laboratorio, para el pretratamiento y análisis de las mismas. Por otra parte, las mediciones continuas de metales pesados unidos al MP se pueden utilizar para explorar los patrones diurnos de las emisiones, estudiar las fuentes industriales, quema de biomasa o vehiculares, evaluar los inventarios de emisiones, validar modelos numéricos, determinar la exposición de las personas, evaluar el cumplimiento de normas y realizar seguimiento de emisiones y planes de prevención y descontaminación. En Chile, este tipo de mediciones en tiempo real para elementos y metales pesados en el MP son inexistentes, por lo que realizar mediciones continuas en zonas de representatividad poblacional permitirá cubrir un vacío en la información de la calidad de aire que resulta fundamental para establecer los potenciales efectos en la salud del material particulado (PM) con contenido metálico y al mismo tiempo determinar el alcance de sus impactos en el ambiente.

La calidad del aire en la ciudad de Calama ha sido un tema de preocupación para las autoridades, los habitantes de la ciudad y la industria minera que opera en los alrededores. Las emisiones de las actividades mineras se encuentran entre las principales fuentes de MP en la ciudad de Calama (González et al., 2021). Las emisiones de MP pueden ser el resultado de la operación de maquinaria pesada, detonaciones superficiales, el transporte de minerales en diferentes grados de fragmentación por acción eólica desde acopios y botaderos y las emisiones de la fundición Chuquicamata y la planta de tostación de concentrados de cobre en la División Ministro Hales. Adicionalmente, las emisiones locales de MP y otros gases como CO y NOx también pueden ser el resultado de una gran flota vehicular mayoritariamente privada (>80%) que superó los 52.000 vehículos en 2017 (González et al., 2021; Instituto Nacional de Estadísticas, 2017a).

En este trabajo se presentan los resultados de las primeras campañas de mediciones continuas de metales pesados unidos al material particulado con resolución temporal horaria en la ciudad de Calama con el objeto de comprender su dinámica atmosférica de As y generar antecedentes que aporten a la comprensión del origen, destino y efectos de estos elementos en una ciudad caracterizada por el impacto de las actividades mineras en la calidad del aire. El sistema de monitoreo colecta el MP en una cinta de avance automático efectuando la medición de metales pesados ligados a MP basándose en el principio de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (EDXRF); esta metodología permite la cuantificación de decenas de elementos de la tabla periódica asociados al MP en minutos.

Los resultados mostraron que el perfil diurno de concentraciones de arsénico (As), cobre (Cu), cinc (Zn) y MP10 alcanzan sus máximos en la mañana, mientras que hierro (Fe) se mantiene en niveles elevados durante el mediodía y la tarde. El análisis comparativo de las mediciones continuas realizadas en Calama durante el invierno del año 2022 y el verano-otoño del año 2023 muestran que las concentraciones de metales pesados son mayores durante el invierno, lo que se debería a variaciones estacionales de las condiciones meteorológicas, como cambios el régimen de vientos y las condiciones de ventilación. Diagramas polares bivariados muestran que durante el invierno, los máximos de concentración de As, Cu y Zn, se producen con una componente norte, mientras que en el verano-otoño se producen con una componente noreste y otra suroeste. En el caso de Fe y PM, se observa que los máximos de concentración en el invierno ocurren con una componente oeste, y en menor medida, en condiciones de calma. Estos resultados son consistentes con la atribución de los máximos matutinos de As y elementos correlacionados a las actividades mineras al norte de Calama, mientras que el transporte eólico de PM desde el oeste y suroeste del sitio de monitoreo puede tener orígenes geográficos diversos producto de la resuspensión o transporte a nivel regional. Estos resultados muestran la relevancia que adquieren las mediciones con alta resolución temporal para caracterizar la dinámica espacio-temporal de la contaminación atmosférica, al permitir relacionar los máximos de concentración de metales pesados con el régimen de vientos y los patrones de actividad y emisiones propios de cada zona de estudio.

Palabras Clave: Contaminación Atmosférica, Calidad de Aire, Material particulado, Metales Pesados, Mediciones continuas

Financiamiento: Fortalecimiento de capacidades para la caracterización de multi-metales en aerosoles atmosféricos en tiempo real: red de investigación interdisciplinaria por un aire limpio. Concurso de Equipamiento Científico FONDEQUIP EQM190045. Estudio Arsénico 2022 CODELCO: Concentraciones en tiempo real, dinámica atmosférica y contribución de fuentes.

Agradecimientos: Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

Referencias:

- González-Rojas, Claudio H., Manuel Leiva-Guzmán, Carlos A. Manzano, Raúl G.E. Morales S., Richard Toro Araya, 2021. Short-term air pollution events in the Atacama desert, Chile, Journal of South American Earth Sciences, Volume 105, 2021, 103010, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103010>.
- Instituto Nacional de Estadística, 2017. Bases de Datos Permisos de Circulación por Comuna. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. <https://bit.ly/3dRxl2e>.

Especiación de arsénico en suelos de la zona central

Ana Verónica Valdés Durán¹, Josefa Velásquez², Daniela Garrido³

(1) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, División de Investigación en Aplicaciones Nucleares, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Geología, Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(3) Universidad de Chile, Química Ambiental, Ciencias, Las Palmeras 3425, Macul, Santiago, Chile

El presente estudio aborda resultados preliminares de especiación de arsénico (As^{III} , As^{V}) en la zona de Graneros, región de O'Higgins, con el fin de evaluar el daño potencial de anomalías de arsénico total (134 mg/kg), identificadas en estudios previos (Valdés et al., 2021).

Para este estudio se realizó un trabajo de terreno el año 2019, de aproximadamente 10 días, en la localidad de Graneros y sus alrededores. Las muestras fueron de suelo, tipo compósito y tomadas a 20-30 cm de profundidad con utensilios plásticos, evitando así, el contacto con elementos metálicos. La densidad de muestreo en zonas urbanas fue cada 500 metros, en zonas periurbanas de 2-3 kilómetros aproximadamente y en zonas rurales de 5 kilómetros aproximadamente. De este modo, se pudo aplicar el modelo de interpolación IDW, llevado a cabo con el software ArcGIS 10.4.

Los análisis de especiación se hicieron con el fin de determinar la presencia de formas inorgánicas de arsénico como el arsenito (As^{III}) y arseniato (As^{V}) y, por lo tanto, evaluar el alcance de la contaminación por arsénico en el área de estudio. Los análisis se realizaron con Cromatografía Iónica de Acoplamiento en ICP-MS, con el equipo Thermo Scientific Dionex ICS-6000 SP de la Facultad de Química de la Universidad de Concepción.

Los resultados indican que del total de muestras analizadas (40 aproximadamente), todas presentan mayores concentraciones en forma de arsenito (As^{III}), con un máximo de 53,6 mg/kg, mínimo de 8,31 mg/kg, mediana de 12,8 mg/kg y media de 31,6 mg/kg. Mientras que el arseniato (As^{V}) presenta un máximo de 9,44 mg/kg, mínimo de 2,19 mg/kg, mediana de 3,19 mg/kg y una media de 4,61 mg/kg.

La espacialización de los resultados arroja diversas franjas que, de norte a sur, evidencian un decrecimiento en los rangos composicionales de As^{III} , los que varían de mayor (42,6 - 53,5 mg/kg) a menor (8,31 a 10,82 mg/kg), respectivamente. El As^{V} , presenta un comportamiento similar, aunque diferente. Hacia el norte se observan altas concentraciones las que varían predominantemente entre 5,02 y 6,18 mg/kg. Hacia el sur si bien, tienden a decrecer las concentraciones, también se aprecia una diferenciación en la este-oeste, identificándose mayores concentraciones (3,32 a 5,02 mg/kg) al oeste de Graneros y Rancagua, mientras que en el sector oriental los rangos disminuyen (2,19 a 3,32 mg/kg).

La presencia de arsenito y arseniato confirman la presencia de arsénico inorgánico presente en los suelos del área de estudio. Sin embargo, a diferencia de estudios de especiación de As^{III} y As^{V} realizados en sedimentos y aguas de zonas próximas al área de estudio, predomina el As^{V} (Richter et al., 2004), a diferencias de las muestras de suelos analizadas en el presente estudio, donde predomina el As^{III} en todo el conjunto de muestras.

Palabras Claves: arsenito, arseniato, geoquímica, ambiental, suelos.

Financiamiento: CONICYT + PAI/INSERCIÓN EN EL SECTOR PRODUCTIVO, SEGUNDA CONVOCATORIA 2018 Folio + (7818I20011).

Agradecimientos: A Marco Acuña de la CCHEN, por el apoyo en el transporte y toma de muestras, a Josefa Velásquez por el trabajo de campo y a Luis Navarro Frez por el apoyo logístico.

Referencias:

- Richter, P., Seguel, R., Ahumada, I., Verdugo, R., Narváez, J., & Shibata, Y. (2004). Arsenic speciation in environmental samples of a mining impacted sector of central Chile. Journal of the Chilean Chemical Society. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072004000400012>.
- Valdés, A., Aliaga, G., Deckart, K., Karas, C., Cáceres, D., Nario, A. (2021). The environmental geochemical baseline, background and sources of metal and metalloids present in urban, periurban and rural soils in the O'Higgins region, Chile. Journal Environmental Geochemistry and Health. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01098-4>.

Variabilidad espacio-temporal a largo plazo, de la composición elemental de arsénico en material particulado, en el entorno del Complejo Industrial Las Ventanas

Ana Verónica Valdés Durán¹, Richard Toro A.², Manuel Leiva G.², Luis Felipe Sánchez², Tomás Claramunt², Javier Ramírez², Luis Navarro F.²

(1) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Centro de Tecnologías Nucleares en Ecosistemas Vulnerables, División de Investigación en Aplicaciones Nucleares, Nueva Bilbao 12501, Las Condes, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Química Ambiental, Ciencias, Las Palmeras 3425, Macul, Santiago, Chile

Introducción

El arsénico (As) está ampliamente distribuido en todos los compartimentos de la Tierra, proveniente de fuentes naturales y antropogénicas (Fatoki & Badmus, 2022). El arsénico está presente en más de 200 formas minerales, principalmente arseniatos, sulfuros y sales azufradas. La química del arsénico es compleja, ya que implica una variedad de estados de oxidación, especies aniónicas y catiónicas, y se presenta como compuestos inorgánicos y orgánicos (Rae, 2020; Yuan et al., 2022). Entre las fuentes naturales que emiten As a la atmósfera, se pueden mencionar emisiones desde el suelo por el metabolismo microbiano, la actividad volcánica, la erosión eólica, los incendios forestales y los aerosoles marinos. Entre las fuentes antropogénicas se destacan las emisiones de las actividades mineras, la quema de combustibles fósiles y aplicaciones agrícolas. Se ha estimado que cerca de dos tercios de las emisiones de As a la atmósfera provienen de fuentes antropogénicas (Chilvers y Peterson, 1987). Por lo anterior, el presente trabajo muestra la variación histórica de As en División Ventanas y su enriquecimiento respecto a los valores promedios de la corteza cortical.

Metodología

El presente estudio corresponde al análisis de datos de la información de calidad de aire histórica (2010-2022) de los niveles de concentración de As en el material particulado atmosférico de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros (MP10) de la División Ventanas de CODELCO, con el fin de generar antecedentes que aporten con información actualizada al proceso de elaboración de la Norma Primaria de Calidad de Aire para As (NPCAAs) en Chile. Como objetivos específicos se propone un análisis comparativo entre los niveles de concentración de As históricos y estándares de calidad de As en el aire, extraídos de la revisión de literatura internacional sobre normativas de As y de la propuesta de NPCAAs encargada recientemente por el Ministerio de Medio Ambiente que permitan evaluar el grado de cumplimiento de los niveles ambientales de As en las zonas aledañas a las fundiciones de CODELCO, entre ellas la División Ventanas. Este estudio es parte de un análisis global de las 4 Divisiones de CODELCO para los objetivos anteriormente descritos.

Las planillas de datos presentan la fecha en formato dd-mm-yyyy y la concentración de As en $\mu\text{g m}^{-3}$ N. Los períodos de muestreo en todos los datos son de 24 horas y la frecuencia de medición es cada 3 días.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de la información proporcionada incluye el cálculo de parámetros estadísticos descriptivos (media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo, número de datos disponible y número de datos perdidos) para los niveles de concentración de As para cada año y cada sitio de muestreo de la División.

Por lo general, la información de calidad del aire no presenta una distribución normal; por lo tanto, el cálculo de parámetros estadísticos como el rango intercuartílico (RIC) pueden resultar útiles para describir bases de datos de contaminantes del aire. Es por esto que, los niveles de concentración de As se presentan en diagramas de caja y bigote para cada año de mediciones y para los meses de año. Un diagrama de caja y bigotes, muestra el mínimo, el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3) y el máximo. A partir de Q1 y Q3, se definen los límites superiores e inferiores. Estos corresponden al RIC ampliado en 1,5 veces la longitud de la caja (RIC) hacia el máximo y el mínimo, respectivamente. Esto es definido algebraicamente y los valores individuales que van más allá de estos límites se consideran anómalos o valores atípicos. En este reporte, se presentan diagramas de caja y bigote que incluyen la media de los datos como un punto dentro de cada caja y a la derecha e izquierda de cada caja se presenta la distribución de frecuencias de los niveles de concentración de As y los datos originales como puntos, respectivamente. Adicionalmente, el número en color rojo en la parte inferior de cada diagrama, representa el número total de datos considerados

Resultados

La División Ventanas cuenta con siete sitios de muestreo (Figura 1): La Greda, Puchuncaví, Los Maitenes, Sur, Villa Alegre, Quintero y Ventanas. Cabe destacar que, la estación Quintero tiene registros desde el año 2011 y la estación Ventanas desde el año 2013 a diferencia del resto de las estaciones que tiene registros desde el año 2010. En estos sitios se observa un comportamiento estacional de los niveles de concentración de As registrados cada año, donde los valores máximos de concentración de arsénico ocurren en temporadas frías (otoño-invierno), alcanzando 531 ng m^{-3} (La Greda, 2012), 451 ng m^{-3} (Puchuncaví, 2012), 801 ng m^{-3} (Los Maitenes, 2013), 988 ng m^{-3} (Sur, 2011), 291 ng m^{-3} (Villa Alegre, 2011), 1.453 ng m^{-3} (Quintero, 2014) y 527 ng m^{-3} (Ventanas, 2013). Al comparar los datos entre los distintos sitios de muestreo, se puede observar que los valores máximos registrados en los años analizados, en orden descendente fueron: Quintero > Sur > Los Maitenes > La Greda > Ventanas > Puchuncaví > Villa Alegre.

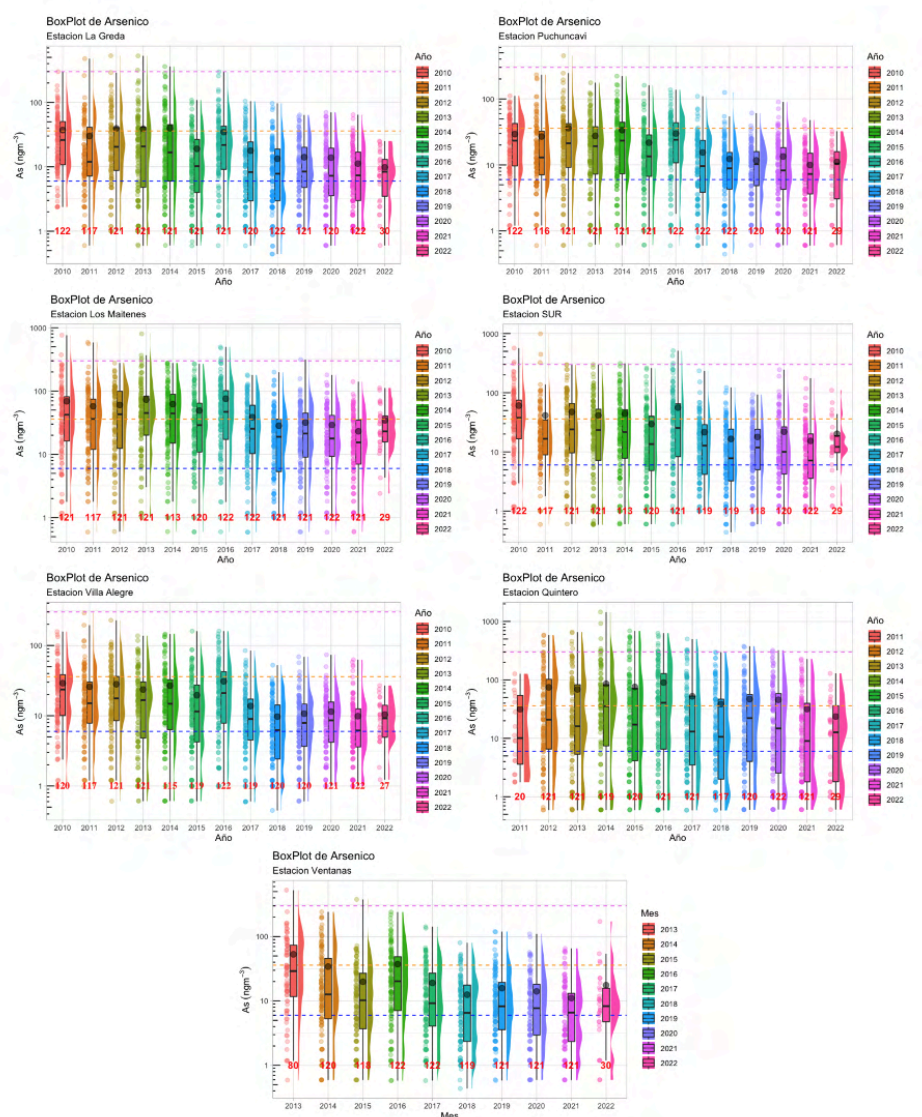


Figura 1: Diagramas de caja y bigote por año en cada sitio de muestreo de la División Ventanas. En líneas horizontales discontinuas se destacan el estándar de calidad de aire anual de 6 ng m^{-3} (azul) y dos estándares para un tiempo de exposición diario (24 horas) de 36 ng m^{-3} (anaranjado) y 300 ng m^{-3} (rosado). Notar que la escala de eje de las ordenadas es logarítmica.

Las estaciones La Greda, Puchuncaví, Sur y Villa Alegre, presentan una variabilidad similar a las concentraciones anuales de arsénico durante el periodo de años monitoreados (2010-2022). Esta variabilidad a través del tiempo presenta periodos de disminución (2010-2011, 2012-2013, 2014-2015, 2016-2018 y 2019-2021) y de aumento (2011-2012, 2013-2014, 2015-2016, 2018-2019 y 2021-2022). La estación Los Maitenes presenta la misma tendencia descrita anteriormente, con una diferencia entre los años 2013 y 2014, consistente en una disminución de la mediana y del promedio.

La estación La Greda presentó la mediana más baja ($7,26 \text{ ng m}^{-3}$) el año 2020, mientras que las estaciones El Sur y Villa Alegre, presentaron las medianas más bajas el año 2021 correspondiente a $7,14 \text{ ng m}^{-3}$ y $6,18 \text{ ng m}^{-3}$, respectivamente. La mediana máxima de estas tres estaciones se observó en el año 2010, ($26,1 \text{ ng m}^{-3}$, $37,6 \text{ ng m}^{-3}$ y $23,7 \text{ ng m}^{-3}$). Las estaciones Puchuncaví, Los Maitenes y Quintero presentaron su mediana más baja ($7,28 \text{ ng m}^{-3}$; $15,4 \text{ ng m}^{-3}$ y $9,01 \text{ ng m}^{-3}$) el año 2021 y la más alta (24 ng m^{-3} ; $46,9 \text{ ng m}^{-3}$ y $40,6 \text{ ng m}^{-3}$) el año 2016. Por otra parte, la mediana mínima y máxima del sitio Ventanas fueron de $6,52 \text{ ng m}^{-3}$ (2018) y $29,1 \text{ ng m}^{-3}$ (2013), respectivamente.

Si bien se constata una tendencia decreciente en el tiempo a partir del año 2017, la mediana y la media de todas las estaciones en el periodo comprendido entre 2010-2022 exceden el estándar anual de 6 ng m^{-3} .

Valores del Límite Superior y valores anómalos anuales

En la mayoría de las estaciones se observa que los datos ubicados entre el percentil 75 (Q3) y el Límite Superior (LS), superan el valor de referencia diario de 36 ng m^{-3} , con excepción del año 2022 en La Greda, Puchuncaví y Villa Alegre.

Con respecto a estos valores (Q3-LS), en orden decreciente, la estación Quintero supera el valor de referencia de 300 ng m⁻³ en la mayoría de los años monitoreados (2012-2020). Continúa la estación Los Maitenes con 5 años (2010, 2011, 2013, 2016 y 2019) que sobrepasan este valor de referencia, aunque con algunos años (2012, 2014 y 2015) que sólo alcanzan este límite. Posteriormente, se encuentra la estación La Greda con tres años que sobrepasan el valor de referencia (2011, 2013 y 2014), mientras que los años 2010, 2012 y 2016 coinciden con el límite de esta. Con sólo dos años (2010 y 2016) la estación Sur supera el valor de referencia diario más alto, más varios años que alcanzan este límite (2012, 2013, 2014, 2015 y 2020). También la estación Ventanas supera el valor de referencia diario de 300 ng m⁻³ en dos años de monitoreo (2012 y 2015) y no presenta valores límites. Ningún año de las estaciones Puchuncaví y Villa Alegre, sobrepasan el valor de referencia de 300 ng m⁻³.

La mayoría de las estaciones presenta al menos un año con valores anómalos que superan el valor de referencia diario de 300 ng m⁻³. Estos años son el 2011 en Villa Alegre y Estación Sur, 2012 en Estación La Greda y Puchuncaví. Las estaciones Puchuncaví y Sur, también presentan un valor extremo los años 2018 y 2022, respectivamente, pero no superan este límite. La Estación Ventanas también presenta un valor anómalo el año 2022, sin embargo, no excede el valor de referencia diario de 300 ng m⁻³. Finalmente, Estación Quintero, no presenta valores anómalos.

Conclusiones y recomendaciones

En División Ventanas, las estaciones con mayores concentraciones anuales (valores máximos) fueron Quintero (1453 ng m⁻³, 2014) y Los Maitenes (801 ng m⁻³, 2013). Los valores máximos de la mayoría de los años analizados se observaron en la primera mitad del período analizado (2011 y 2014). Con respecto a la superación de estándares y/o lineamientos en base anual, la media de la División Ventanas sobrepasa la norma anual. La media de todas las estaciones en el período comprendido entre 2010-2022, excede el estándar anual de 6 ng m⁻³. Por otra parte, y según los límites propuestos en informe "Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico" (MMA-DICTUC, 2022) de 15; 23,3 y 46,6 ng m⁻³, presentan excedencias en los valores propuesto de 15 y 23,3 ng m⁻³. Siendo las estaciones Quintero y Los Maitenes las con mayores excedencias. Respecto de la normativa propuesta de 46,6 ng m⁻³, esta zona se encontraría en latencia, ya que la excedencia se encuentra entre el 80% y 100% del límite establecido, dada por las concentraciones observadas en la estación Quintero.

Con respecto a la representatividad de los datos, en el caso del As, las mediciones se realizan mediante un monitoreo discontinuo en una frecuencia que en general corresponde a 1 monitoreo de 24-horas cada 3 días; lo que significa que se contará con un máximo de 120 datos al año para evaluar la normativa en base anual. La Unión Europea (EU) ha establecido lineamientos para caracterizar la calidad de los datos de monitoreo de la calidad del aire y que para ello considera aspectos como: Incertidumbre permitida; Cobertura temporal de mediciones y Cantidad mínima de material de medición. Esto tiene por objeto el proporcionar información sobre la confiabilidad y cuán exhaustivos son los resultados de la medición. Los objetivos de calidad deben tenerse en cuenta en el diseño del monitoreo de la calidad del aire y documentarse.

Para As la EU recomienda, en estaciones de medición fijas, considerando un 40% Incerteza, que se cuente con una captura de datos mínima de un 90% con una cobertura de temporal mínima del 50%. Esto implicaría que para cumplir con estos objetivos de calidad anual se deberían muestrear un mínimo de 160 muestras al año, es decir una frecuencia de 1 muestra de 24 horas día por medio, asegurando una incerteza del 40%. El muestreo debería repetirse uniformemente entre los días de la semana y el año.

Estas recomendaciones tienen su fundamento en los principios de la Guía del Comité Européen de Normalization (CEN CR 14377:2002; ENV 13005:2004) para la expresión de la incertidumbre en la medición, la metodología de la norma ISO 5725:2020 - "Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos de medición y de los resultados" (ISO 5725:2020), ISO 11222:2002 - "Determinación de la incertidumbre de la media temporal de las mediciones de la calidad del aire" (ISO 11222:2002). Los porcentajes de incertidumbre (en el caso As 40%) se indican para las mediciones individuales, que se promedian a lo largo de tiempos de muestreo típicos, para un nivel de confianza estadístico del 95 %. La incertidumbre de las mediciones debe interpretarse como aplicable en la región del valor objetivo apropiado. Las mediciones fijas e indicativas deben distribuirse uniformemente a lo largo del año para evitar que los resultados sean sesgados.

Palabras Clave: Geoquímica, Ambiental, Arsénico, Material Particulado.

Financiamiento: Concurso de Equipamiento Científico FONDEQUIP EQM190045. Estudio Arsénico 2022 CODELCO: Concentraciones en tiempo real, dinámica atmosférica y contribución de fuentes.

Agradecimientos: Gracias a todo el equipo de trabajo.

Referencias:

- Fatoki, J. O., & Badmus, J. A., 2022. Arsenic as an environmental and human health antagonist: A review of its toxicity and disease initiation. Journal of Hazardous Materials Advances, 5, 100052. [doi:10.1016/j.hazadv.2022.100052](https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100052).
- Rae, I. D., 2020. Arsenic: its chemistry, its occurrence in the earth and its release into industry and the environment. ChemTexts, 6(4), 25. [doi:10.1007/s40828-020-00118-7](https://doi.org/10.1007/s40828-020-00118-7).
- Yuan, C., et al, 2022. Chemical oxidation of arsenic in the environment and applications: A mini review. Pedosphere. [doi:10.1016/j.pedsph.2022.06.033](https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.033).
- Chilvers D.C., Peterson P.J., 1987. Global cycling of As, in: T.C. Hutchinson, K.M. Meena (Eds.), Lead, Mercury, Cadmium and as in the Environment, John Wiley & Sons, 279-301.
- MMA-DICTUC, 2022. INFORME FINAL – Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico (Informe No 1579582), Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente en el Marco del proyecto Antecedentes para la elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico y revisión de la Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico <http://shorturl.at/hINPS>.

Relación espacio-temporal entre las concentraciones de As, Fe, Cu, Zn, V y Mo en aguas superficiales y sedimentos activos del río Huasco

Josefa Paz Velásquez González¹, Ana Verónica Valdés Durán², Katja Deckart³

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Tecnologías Nucleares, Nueva Bilbao 12.501, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Geología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

El río Huasco (28°30'S), ubicado en la zona sur de la región de Atacama, se encuentra en un contexto climático semiárido, con eventos esporádicos generados por los fenómenos La Niña y el Niño (Aceituno, 1988). En el trabajo de Valdés *et al.*, 2022, se entregan antecedentes sobre la geoquímica de aguas y sedimentos activos del río Huasco. Lo interesante, es que, siempre que la accesibilidad lo permitió, los autores señalados tomaron muestras de aguas y sedimentos en el mismo punto. Por otro lado, plantean que cuando ocurre un aumento en el flujo superficial del río, las concentraciones químicas aumentan en aguas superficiales y disminuyen en sedimentos activos. Se seleccionaron los elementos As, Fe, Cu, Zn, V y Mo dado que son de especial interés, puesto que sus concentraciones estarían dadas principalmente por la presencia de depósitos de la franja ferrífera es decir, serían de origen principalmente natural según lo planteado en Valdés *et al.* (2022), así como por otros autores (Lacassie *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2010) que asocian el origen de los sedimentos del río a la presencia de depósitos de Fe, Cu, Fe-Cu-Au, Ag, Co y Mn y a la actividad minera presente en el sector. Lo anterior se suma a que se cuenta con las concentraciones pesquiasadas por Valdés *et al.* (2022) de los elementos mencionados en aguas y sedimentos. Por otro lado, no dejan de ser elementos potencialmente tóxicos, por tanto, comprender los cambios composicionales de aguas y sedimentos en un contexto en el cual las sequías y eventos climáticos se van haciendo más extremos, permiten conocer las dinámicas físico-químicas de los sistemas fluviales en el contexto actual.

Para profundizar en lo planteado por Valdés *et al.*, 2022, es que se realizaron perfiles de concentración versus distancia al mar, esta vez solo con aquellos puntos donde se tomaron muestras de ambas matrices, lo que da un total de 9 puntos de análisis para 2007 y 6 para 2008. Lo que se espera, es observar si existe relación entre ambas matrices más allá de su origen; es decir describir si existe una correlación espacio-temporal entre ambas, a partir tanto de perfiles como de análisis de correlación de Pearson. Se realizaron dos matrices de Pearson, una para el año 2007 y otra para el año 2008, para ello los datos fueron llevados a la misma unidad de medida (ppm) y tratados con la transformación logarítmica *ilr* (*Isometric log-ratio*) la cual permite trabajar las concentraciones de manera adimensional, y disminuyendo el impacto de las diferencias de concentración entre aguas y sedimentos. En la matriz del año 2007 se observan altas correlaciones (superior a +0,90) entre los elementos As, Cu, V y Mo presentes en aguas superficiales, mientras que en sedimentos los pares que presentan una buena correlación son As, Zn, Fe y V. El elemento Mo presente en sedimentos se correlaciona bien (valores entre +0,6 y +0,7) con As, Zn, Mo y V presentes en las aguas. Para el año 2008 se observa que existen menos pares correlacionados en aguas superficiales: Zn se correlaciona con As (-0,82) y Cu (-0,58) y Fe se correlaciona con Mo (+0,68), en sedimentos se observa un aumento en los pares correlacionados; con correlaciones entre aquellos conformados por Fe, Cu, Mo, Zn y V, destacando el par Fe-V con una correlación de +1. En cuanto a la correlación de aguas y sedimentos se observa también un aumento en los pares; el Mo en agua superficiales forma pares con con As, Fe, Cu, Zn, V y Mo con valores entre +0,55 y +0,7, por otro lado los elementos presentes en sedimentos Cu y Zn se correlacionan (+0,71 y +0,73) con el Fe en aguas superficiales. Así, se observa que existe correlación entre las concentraciones de aguas-sedimentos, las cuales se hacen más notorias posterior al aumento en el flujo superficial.

Palabras Clave: Geoquímica, aguas superficiales, sedimentos

Financiamiento: Programa ALBAN, programa de becas de alto rendimiento para Latinoamérica, adjudicado en 2006, así como CNRS-IRD y el Laboratorio GET (Géosciences Environnement Toulouse, France), de la Universidad Paul Sabatier, France.

Agradecimientos: María Eliana Escobar: toma de muestras, Françoise Risacher: apoyo en metodología de muestreo y préstamo de material. Profesionales del Laboratorio GET que colaboraron con los análisis de este trabajo.

Referencias:

- Aceituno, P., 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector: part I. Surface climate, Monthly Weather Review. 116: 505– 524.
- Díaz, A., Lacassie, J.P. & Ruiz del Solar, J., 2010. Análisis de datos mineralógicos y geoquímicos de sedimentos del sistema fluvial del río Huasco, Región de Atacama, Norte de Chile. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp N°9 (2010), Cusco p. 1292-1293.
- Lacassie, J.P., Díaz, A., Ruiz del Solar, J., 2009. Geoquímica de sedimentos del sistema fluvial del río Huasco. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, 22-26 Noviembre, 2009.
- Valdés, A., Velásquez, J., Neculqueo, G., Deckart, K., Cáceres, D., Navarro, L., Troger, D., Canales, A., Buscaglia, M. & Escobar, M.A., 2022. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco river. Journal of South American Earth Sciences. 118: 103927.

Nitrato en el río Huasco: Concentraciones, distribución espacial y procedencia

Josefa Paz Velásquez González¹, Ana Valdés Durán²

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Comisión Chilena de Energía Nuclear, Tecnologías Nucleares, Av. Nueva Bilbao 12.501, Santiago, Chile

Introducción:

El río Huasco (28°30'S) se ubica en el Norte Chico de nuestro país, zona geográfica caracterizada por un clima semi-árido con precipitaciones variables durante el invierno y períodos de sequía intermitentes. Nace en la confluencia de los ríos del Carmen y del Tránsito, recorriendo aproximadamente 90 km hasta el Océano Pacífico, cruzando las ciudades de Vallenar, Freirina y Huasco. EL curso del río se ve interrumpido unos kilómetros más hacia el oeste de su nacimiento, por el Embalse Santa Juana, el más grande de la región de Atacama, construido en 1995, con un muro de 100 metros de alto y capacidad de almacenar 165 millones de metros cúbicos de agua destinados a garantizar la disponibilidad de aguas para 10 mil hectáreas de cultivos agrícolas a lo largo del valle (<https://www.riohuasco.cl/embalse-santa-juana/>).

El 90% de las precipitaciones anuales se concentran entre los meses de mayo-agosto, mientras que en los meses de septiembre-abril, el clima se mantiene cálido y árido (Montecinos & Aceituno, 2003).

La cuenca hidrográfica es importante dentro de la región: en ella residen 60.000 habitantes y sustentar actividades económicas como lo son una agricultura intensiva, cuya superficie cultivada es de 8.727 has, la minería con la presencia de los yacimientos Pascua-Lama, el Morro, la planta peletizadora de Hierro de Huasco y el establecimiento del proyecto agroindustrial Valle del Huasco para la producción de carne de cerdo.

Dada la escasez del recurso hídrico en el sector, es que bajo la ley 19.300 sobre bases generales sobre el medio ambiente, se ha estado tramitando una Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Huasco. A modo general, este tipo de normas establecen concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de ciertos contaminantes cuya presencia o ausencia puede constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente. Estas normas tienen un ámbito territorial, que pueden abarcar todo el país o parte de él. Actualmente, se encuentran vigentes las NSCA que protegen a los ríos Serrano (2010), Maipo (2014), Valdivia (2015), Biobío (2015) y los lagos Llanquihue (2010) y Villarica (2013). El día 17 de abril de 2020 el anteproyecto de la norma que protege las aguas del Huasco fue aprobado (<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1145408>); en él se encuentran los elementos normados, valores máximos admisibles y áreas de vigilancia. Los parámetros normados en el anteproyecto son pH, conductividad, oxígeno disuelto, sulfato, fosfato, amonio, nitrato, cobre total, hierro total, zinc total, manganeso total, mercurio total, aluminio total, arsénico total, cianuro total y coliformes totales, además, los valores máximos admisibles varían según las áreas de vigilancia. Los parámetros fueron definidos según 3 criterios: 1. Toxicidad; aquellos parámetros que son directamente tóxicos para la biota (metales pesados, amonio, pH), 2. Parámetros no tóxicos que pueden afectar directamente a la biota y el ecosistema (nutrientes) y 3. Parámetros que pueden afectar la toxicidad de otros parámetros (ph, oxígeno disuelto).

De los elementos que aparecen normados, Cu, Fe, Zn, Mn, Al y As, Valdés et al. (2022) los identificaron como contribuciones principalmente "naturales" siendo estos elementos fuertemente relacionados a la presencia de los depósitos minerales ligados a la franja ferrífera que se encuentra presente en el sector. Complementario al estudio anterior, el presente trabajo evalúa las concentraciones de NO₃ bajo la NSCA, así como las concentraciones de nitrato dentro del análisis estadístico. Dado que la agricultura es una actividad importante en el sector, y que el nitrato también es un ion cuya presencia genera preocupación, se incluyó como nueva variable a las ya trabajadas por Valdés et al. (2022), y se realizaron los análisis estadísticos para identificar asociaciones geoquímicas con otros elementos, se construyó el perfil concentración versus distancia al mar y se evaluaron los valores obtenidos bajo los establecidos en el anteproyecto de la NSCA.

Metodología:

Se cuenta con una base de datos geoquímicos de aguas superficiales del río muestreadas en abril de 2007 y enero de 2008 cuya ubicación se observa en la Figura A. La toma de muestras se realizó directamente con contenedores plásticos a una profundidad de 5 a 10 cm, en el centro del canal y a una distancia promedio de 8 km entre cada punto. Las muestras fueron filtradas in situ con filtros de 0,22 µm, en consecuencia, los datos geoquímicos obtenidos representan la fracción disuelta de los elementos presentes en las aguas. Los análisis químicos se llevaron a cabo en el laboratorio GET de la Universidad de Toulouse para un total de 12 muestras obtenidas en 2007 y en laboratorios ACME para las 14 muestras del año 2008. Parte del set de datos incluye el ion nitrato, el cual es objetivo para este estudio.

Para analizar los datos, lo primero es "observar" mediante herramientas gráficas adecuadas (Reimann et al., 2008), y para ello, dada la naturaleza de este tipo de datos, se sugiere que se les aplique una transformación logarítmica. Con los datos ya transformados es posible observar la existencia de anomalías mediante la construcción de diagramas *Box-plot* (Tukey, 1977). Junto con el estudio estadístico, se construyó un perfil O-E que representa concentración (en mg/L) versus distancia al mar (en km), el cual permite visualizar las zonas geográficas donde se encuentran las concentraciones de nitrato más elevadas.

Por último, se compararon las concentraciones de nitrato medidas en este trabajo con las concentraciones máximas admisibles que se encuentran normadas en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas superficiales del río Huasco.

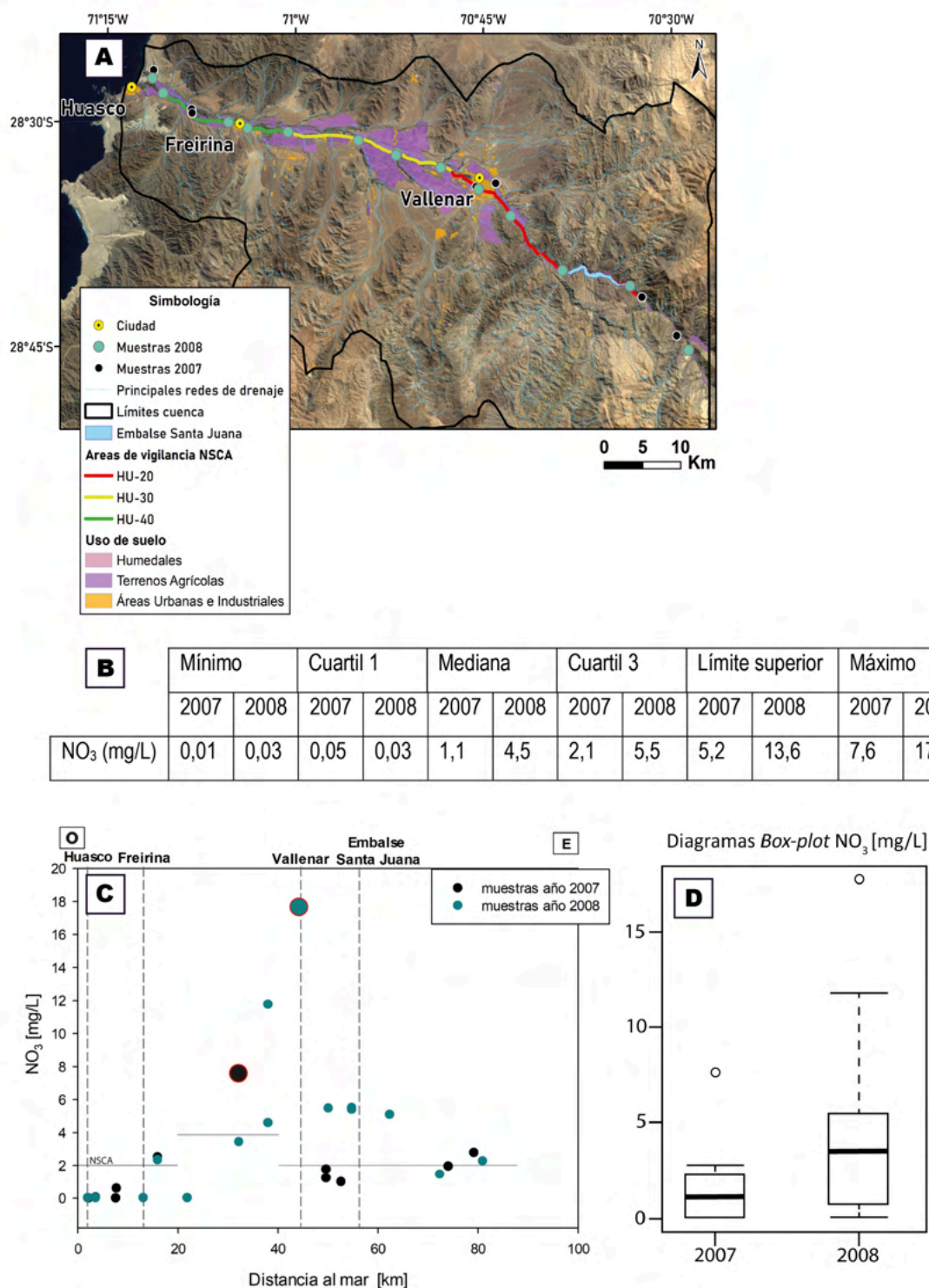


Figura A. Ubicación de los puntos muestreados contrastados con los usos de suelo (fuente: CONAF, 2019).

Figura B. Estadígrafos básicos calculados para el nitrato en ambos períodos.

Figura C. Perfil O-E de concentraciones de Nitrato contrastado con los valores establecidos en la NSCA.

Figura D. Diagramas Box-plot para el nitrato en ambos años.

Resultados

Los estadígrafos básicos, diagramas de *Box-Plot* y perfil O-E se presentan en la figura adjunta (B, D y C respectivamente). Tanto en la tabla como en los diagramas *Box-plot*, se observan valores anómalos. Por otro lado, se observa un aumento de tres veces en la mediana de 2008 respecto al año anterior.

En el perfil O-E de concentración versus distancia al mar (Figura C) se aprecia la distribución geográfica del ion nitrato, en primer lugar no se observan concentraciones elevadas desde las nacientes del río Huasco hacia el oeste, hasta aproximadamente el kilómetro 20, con un valor anómalo en la ciudad de Vallenar para el año 2008 (17,7 mg/L), y para el año 2007 (7,64 mg/L) si bien las concentraciones son inferiores, tanto anomalías como valores más elevados se ubican en la zona media del valle, entre Vallenar y Freirina. En ambos períodos de tiempo las concentraciones más bajas (0,01 mg/L en 2007 y 0,03 mg/L en 2008) se alcanzan en la zona más cercana al mar.

Por último, al perfil de distancia al mar versus concentración, se le agregaron los límites máximos admisibles según la NSCA en cada tramo del río (Figura C). Desde el km 18 hacia el este, el 71% de las muestras consideradas en ambos períodos se encuentra por sobre la norma, siendo los valores normados de 2 mg/L en la zona baja del valle (aguas abajo del km 20), 3,9 mg/L en la zona media del valle (entre los km 20 y 40) y 2 mg/L en la zona alta del valle (desde el km 20 hasta aguas arriba del embalse Santa Juana). En la zona baja del valle, desde el km 18 en dirección al mar, no existen muestras por sobre el valor normado.

Discusión:

En los resultados de los estadígrafos básicos, lo más notorio es el aumento de la mediana de un año a otro. Valdés et al. (2022) también notó aumentos en las medianas de la mayoría de los elementos que trabajaron durante el período 2008, y explica que estos aumentos se deben a un mayor caudal debido a mayor cantidad de lluvias y derretimientos de nieve, lo que facilita el transporte de sedimentos al río, resultando en aumentos del material suspendido y una mayor tasa de disolución de los elementos presentes en dicho material. Por otro lado, los autores consideran que en su mayoría los elementos químicos disueltos en las aguas tendrían un origen principalmente natural, y por ende serían minerales los que se encuentran suspendidos y aportando estos elementos.

El nitrato es un compuesto que se encuentra de forma natural en los suelos y aguas, sin embargo, la mayoría de flujos y transformaciones ocurren en un contexto agrícola. Lixiviación de los suelos y escorrentía superficial son los principales mecanismos por los cuales este ion puede ser transportado desde los suelos a las aguas superficiales (Fowler et al., 2013). En ese sentido, los aumentos de nitrato de 2007 a 2008 no estarían dados por aumentos en la carga de sedimentos en el río, si no que por aumentos en la escorrentía superficial generada por las lluvias. Lo anterior se suma a que la campaña del año 2008 fue realizada en enero, siendo los meses de septiembre-marzo los considerados dentro del período de riego (DGA, 2007), lo que igual es capaz de generar escorrentía superficial vertiendo este compuesto directamente al río.

De lo anterior se desprende que las concentraciones de nitrato tendrían una fuerte componente antropogénica, idea que también es reforzada por el perfil de concentración versus distancia al mar. Según Luque & Sandoval (2018) en la zona media y alta del valle se encuentran plantaciones extensivas de uva de mesa, mientras que en la parte baja, solo persisten los cultivos tradicionales de olivos, siendo esta, amenazada por la alta salinidad de los suelos. Por otro lado, se tiene que la mayor cantidad de hectáreas de suelo en la zona media del valle son destinadas al uso agrícola (Figura A). Justamente, la zona baja del valle, donde los cultivos son más restringidos, las concentraciones de nitrato son más bajas, mientras que, en la zona media, donde hay mayor presencia de actividad agrícola extensiva coincide con los valores más altos para la concentración de este ion. Además de las posibles contribuciones que puedan hacer los fertilizantes agrícolas, no es posible descartar que los residuos domiciliarios de la ciudad de Vallenar, donde se encuentra el valor más alto de este compuesto, estén contribuyendo como fuente puntual.

En cuanto a la comparación de los valores de este trabajo con los valores que propone el anteproyecto de norma de calidad, se observa que, en la zona baja del valle, donde el valor normado es de 2 mg/L, gran parte de las muestras se encuentran bajo ese límite. En la zona media, donde el valor normado es de 3,9 mg/L, a pesar de ser más elevado que en el tramo anterior, las concentraciones medidas en este trabajo se encuentran por sobre la norma, y en la parte alta, el valor normado es de 2 mg/L, con varias muestras, de ambos períodos, por sobre la norma.

Existe poca información actualizada respecto al contenido de nitrato en el río; según la información en línea de las estaciones de medición de la Dirección General de Aguas (DGA), entre 2018 y 2023 se han tomado dos medidas en cada estación de la DGA; en abril y septiembre de 2020. Si bien metodológicamente no es posible comparar los datos de la DGA con los datos de este trabajo, si es posible observar similitudes entre los comportamientos de ambos datos, como por ejemplo, el hecho de que los registros de la DGA presentan las concentraciones de nitrato más bajas (0,425 mg/L en promedio) en la estación más cercana al mar (al oeste del km 18), mientras que las más elevadas se encuentran en la estación más cercana a la ciudad de Vallenar (0,631 mg/L en promedio). Por otro lado, tanto los datos 2020 y 2007/2008, presentan concentraciones mayores en el mes de septiembre, inicio del período de riego. Si se evalúan los datos de la DGA bajo la NSCA, no se observan incumplimientos.

Las altas concentraciones de nitrato en sistemas acuáticos conllevan a condiciones de eutrofización y deterioro del hábitat. En ese sentido, Castillo (2019) describe en su seminario de título las comunidades de macroinvertebrados bentónicos (MIB) presentes en la cuenca, y los utiliza como bioindicadores de las variaciones ambientales. Ensamblajes de MIB altamente tolerantes, que se asocian a condiciones de eutrofización y deterioro del hábitat se encuentran en el río Huasco, mientras que ensamblajes de MIB poco tolerantes se encuentran en sus afluentes.

Por último, para poder precisar de mejor manera la proveniencia de este ion en el río, sería útil un análisis isotópico de N, el cual permite evaluar las diferentes fuentes de forma precisa.

Conclusión:

El nitrato en el río Huasco posee una fuerte componente antropogénica en su procedencia, probablemente asociada a la industria agrícola que se desarrolla en los alrededores del río, siendo la zona media y alta del valle, la más afectada por estas actividades. Por otro lado, es un compuesto altamente móvil, por lo que lluvias y escorrentía superficial aumentan su concentración en las aguas del río. Dada su procedencia, y la evaluación bajo los límites establecidos en el anteproyecto de NSCA, este se considera como un contaminante, y que además cuyos efectos podrían estar afectando el hábitat natural de los organismos que viven en el río.

Palabras Clave: Nitrato, Contaminación, Geoquímica, Agricultura.

Financiamiento: I Programa ALBAN, programa de becas de alto rendimiento para Latinoamérica, adjudicado en 2006, así como CNRS-IRD y el Laboratorio GET (Géosciences Environnement Toulouse, France), de la Universidad Paul Sabatier, France.

Agradecimientos: María Eliana Escobar: toma de muestras, Françoise Risacher: apoyo en metodología de muestreo y préstamo de material. Profesionales del Laboratorio GET que colaboraron con los análisis de este trabajo.

Referencias:

- Castillo, C., 2019. Relaciones entre variables ambientales y macroinvertebrados bentónicos en un gradiente de perturbación de hábitat en la cuenca del Río Huasco. Seminario de Título para optar al título de Biólogo con mención Medio Ambiente (Inédito). Santiago de Chile.
- DGA, 2007. Pronóstico de disponibilidad de agua: temporada 2007-2008. Dirección General de Aguas.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M., Cape, J.N., Reis, S., Sheppard, L., Jenkins, A., Grizetti, B., Galloway, J.N., Vitousec, P., Leach, A., Bouwman, A.F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M. & Voss, M., 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 368: 20130164.
- Luque, R. M. & Sandoval, M. A., 2018. La pervivencia de la olivicultura tradicional en el valle de Huasco (Atacama, Chile). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. 77: 335–367.
- Montecinos, A. & Aceituno, P., 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*. 16: 281-296.
- Tukey, J. W., 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley. 688pp. Reading, Massachusetts.
- Valdés, A., Velázquez, J., Neculqueo, G., Deckart, K., Cáceres, D., Navarro, L., Troger, D. Canales, A., Buscaglia, M. & Escobar, M.A., 2022. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco river. *Journal of South American Earth Sciences*. 118: 103927.

Evaluación de aportes naturales y antropogénicos sobre la distribución de elementos potencialmente tóxicos en suelos urbanos de Valdivia, Chile

Francisca Vera¹, Daniele Tardani², Fernanda Álvarez-Amado³, Violeta Tolorza⁴, Juan Pablo Lacassie⁵, Carolina Sepúlveda¹, Pablo Sánchez-Alfaro¹, Linda Daniele⁶

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Casilla 160-C, Concepción, Chile

(4) Universidad de La Frontera, 4811230, Temuco, Chile

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, Dirección Regional de Los Ríos, Av. Aníbal Pinto, 2031, Valdivia, Chile., Dirección Regional de Los Ríos, Av. Aníbal Pinto, 2031, Valdivia, Chile

(6) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

El aumento de la población en las áreas urbanas en las últimas décadas requiere un esfuerzo para comprender la geoquímica de los elementos contaminantes en el suelo urbano. La capa superior del suelo juega un papel crucial en la exposición de los seres humanos a elementos potencialmente tóxicos (EPT's) a través de la ingestión, el contacto dérmico y la inhalación. En Chile, el último censo reveló que el 88,6% de las personas vive en ciudades o pueblos y sólo el 11,4% en zonas rurales, mientras que en Valdivia un 93,2% de la población reside en el área urbana (INE, 2018). Este estudio presenta el primer levantamiento geoquímico sistemático de suelos urbanos en la ciudad de Valdivia, en el Sur de Chile. Se recolectaron muestras de suelo (0-10 cm de profundidad) en lugares menos perturbados dentro de la ciudad en 130 sitios de muestreo utilizando una cuadrícula de 0,25 km² cuadrados que cubren un área total de aproximadamente 30 km².

Se midieron las concentraciones de Al, Fe, Na, Ca, Mg, K, Ti, Be, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Sn, Cd, Se, Pb y Hg. Los resultados mostraron que las altas concentraciones de Cu, V, Zn y Pb se localizan principalmente en la zona norte de la ciudad y superan la legislación internacional canadiense de calidad de suelo para uso agrícola/residencial y para suelo arcilloso en Alemania bajo. El procesamiento de datos comprendió el trazado de mapas de distribución espacial individuales y el uso de una combinación de métodos estadísticos multivariados. El análisis de conglomerados jerárquicos y el análisis de componentes principales identificaron tres asociaciones de elementos. Los dos grupos de elementos V-Al-Ti-Fe-Cr-Co-Mn-Be-Ni y Ca-Na-K-As-Mg se interpretan como un origen litológico dominante relacionado con las condiciones de suelo más prístinas en áreas menos pobladas al sur de la ciudad. Por el contrario, la asociación Sn-Pb-Zn-Mo-(Cu-Hg) presenta una correlación significativa con los indicadores de urbanización, incluyendo el tráfico vehicular y las actividades industriales desarrolladas desde finales del siglo XIX en Valdivia.

Palabras Clave: Control de calidad, Componentes principales, Análisis de clúster, Evaluación de riesgos para la salud, Valdivia.

Financiamiento: Financiamiento proyectos ANID-Fondecyt #11190864, ANID-Fondecyt 1201219, ANID-Fondecyt 11220777, and ANID-FONDAP 15130015 (CRHIAM).

Agradecimientos: Agradecer a los proyectos ANID-Fondecyt 11190864, ANID-Fondecyt 1201219, ANID-Fondecyt #11220777 y ANID-FONDAP #15130015 (CRHIAM), con los cuales fue posible llevar a cabo este estudio.

Referencias:

- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2018. Censo 2017.

Pronosticadores generalizados de erupciones volcánicas utilizando datos sísmicos y machine learning: ejemplos en erupciones magmáticas y freáticas

Alberto Ardid¹, David Dempsey¹, Carlos Cardona², Corentin Caudron³, Shane Caudron⁴

(1) University of Canterbury, Christchurch, New Zealand

(2) OVDAS, Sernageomin, Temuco, Chile

(3) Université Libre de Bruxelles, Bruselas, Bélgica

(4) University of Auckland, Auckland, Nueva Zelanda

RESUMEN

Las erupciones volcánicas representan una amenaza significativa para la vida humana y la infraestructura, y la disponibilidad limitada de datos para ciertos volcanes dificulta el pronóstico acertado de erupciones. En este estudio, exploramos el uso de volcanes análogos para entrenar modelos de pronóstico de aprendizaje automático utilizando datos sísmicos y demostramos su potencial para generalizar información de los precursores y ampliar el rango de volcanes aplicables. Al entrenar y probar varios modelos en más de 10 volcanes de todo el mundo, exploramos el uso de pronosticadores volcánicos para evaluar su confiabilidad en el proceso de pronóstico, y su capacidad de discriminación en registros sísmicos extendidos para evaluar el rendimiento general al distinguir entre una erupción inminente y períodos no eruptivos. Mediante el aprendizaje por transferencia, nuestros modelos identificaron con éxito los precursores de erupción para volcanes con registros eruptivos limitados y emitieron advertencias para erupciones previamente no observadas. Nuestros resultados resaltan la viabilidad del aprendizaje automático en el pronóstico de erupciones volcánicas para volcanes con registros eruptivos limitados y enfatizan la necesidad de más investigación y recopilación de datos para mejorar su efectividad.

1. INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas son uno de los fenómenos naturales más espectaculares de la Tierra, pero también pueden ser increíblemente destructivas y mortales. El pronóstico de erupciones volcánicas es la ciencia de anticipar cuándo y cómo un volcán entrará en erupción. Ha habido varios ejemplos famosos de erupciones volcánicas que se anticiparon con éxito en la historia reciente. Algunos ejemplos notables incluyen: el monte Pinatubo en 1991, Filipinas (por PHIVOLCS; Newhall et al., 1996), el volcán Redoubt en 2009, Alaska, Estados Unidos (por AVO; Schaefer, 2011), Merapi en 2010, Indonesia (por CVGHM; Surono et al., 2012), el monte Etna en Italia (Ripepe et al., 2018), y el volcán Villarrica en Chile en 2014 (por OVDAS; Johnson et al., 2018). Estos ejemplos demuestran la importancia de un pronóstico efectivo de erupciones volcánicas y el papel fundamental que desempeñan la ciencia y la tecnología en la minimización de los impactos de las erupciones volcánicas.

Las características únicas y comunes de los volcanes plantean desafíos y oportunidades para el monitoreo y pronóstico de la actividad volcánica (Cashman y Biggs, 2014). Los pronosticadores de volcanes generalizados y adaptados son dos enfoques para pronosticar la actividad volcánica. Un pronosticador generalizado puede aplicarse a una amplia gama de volcanes sin una personalización significativa, mientras que un pronosticador adaptado está personalizado para un volcán específico o un escenario de erupción (por ejemplo, Ripepe et al., 2018; Dempsey et al., 2022; Cardona et al., 2021; Basualto et al., 2023). La elección entre estos enfoques depende de las necesidades y requisitos específicos del problema de pronóstico y los datos disponibles. En la práctica, se puede utilizar una combinación de ambos enfoques.

El aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés; Machine Learning) es una herramienta emergente para el pronóstico de erupciones volcánicas. El ML puede complementar las herramientas actuales para pronosticar erupciones porque puede analizar grandes cantidades de datos e identificar patrones y correlaciones que pueden no ser obvios al ojo humano. Además, puede aprender y adaptarse continuamente a nuevos datos, mejorando su precisión con el tiempo. Además, el ML se puede utilizar para analizar diversos tipos de datos, incluidos datos sísmicos, de gas y satelitales; lo que proporciona una comprensión más completa de la actividad volcánica. El ML puede ahorrar tiempo y recursos, ya que puede automatizar muchos de los procesos manuales involucrados en el pronóstico de erupciones.

Aunque aún no hay muchos ejemplos de ML utilizados en la práctica, hay algunos resultados prometedores. Por ejemplo, la coincidencia de patrones no supervisados se ha utilizado para identificar precursores de erupción en el Monte Etna, aunque los intentos de clasificar el inicio de erupción no han tenido éxito (Langer et al., 2011). Dempsey et al., 2020-2022 desarrollaron un pipeline de aprendizaje automático que combina la extracción de precursores a partir de datos de sísmicos volcánicos, modelado de clasificación de inminencia de erupción y un modelo de decisión que emite alertas de erupción. Bajo condiciones de prueba pseudo prospectivas, el modelo de ML pudo pronosticar cuatro de los cinco episodios eruptivos recientes en Whakaari, incluida la erupción fatal de 2019, con un costo de 13 días de falsas alarmas por año.

Un concepto clave en ML relevante en el entrenamiento de modelos de pronóstico es la validación cruzada (CV, por sus siglas en inglés; Cross Validation). CV en aprendizaje automático se utiliza para evaluar el rendimiento de un modelo. Consiste en entrenar un modelo en todos los ejemplos de un conjunto de datos excepto uno, y luego utilizar el ejemplo omitido como conjunto de validación para probar el rendimiento del modelo. Este proceso se repite para cada ejemplo en el conjunto de datos, lo que resulta en un modelo para cada ejemplo. El rendimiento del modelo se promedia en todos los modelos para obtener una estimación del rendimiento del modelo. Esto proporciona una estimación imparcial del rendimiento del modelo.

En este trabajo desarrollamos un sistema generalizado de pronóstico de erupciones utilizando ML que combina la extracción de precursores a partir de datos sísmicos, la modelización de la inminencia de erupciones y un modelo de decisión que cuantifica la

probabilidad de erupción a corto plazo. A partir de un conjunto de registros sísmicos en erupciones magmáticas registradas en volcanes en Alaska y erupciones freáticas registradas en Nueva Zelanda (Figura 1a) definimos grupos basados en su tipo de erupción (Figura 1b). Para estos conjuntos de erupciones, entrenamos y probamos modelos de pronóstico utilizando validación cruzada (Figura 1c). Luego, comparamos el rendimiento en términos de confiabilidad y discriminabilidad de estos modelos de pronóstico entrenados en diferentes grupos de volcanes. Los resultados indican que los modelos aprendieron a identificar correctamente los precursores de erupciones en volcanes con pocos registros eruptivos, además los utilizaron para emitir advertencias avanzadas para erupciones que no habían sido observadas previamente (en un ejercicio retrospectivo). En líneas generales, este trabajo muestra que la información sísmica precursora puede compartirse entre volcanes, lo que permite entrenar modelos de pronóstico mediante aprendizaje por transferencia.

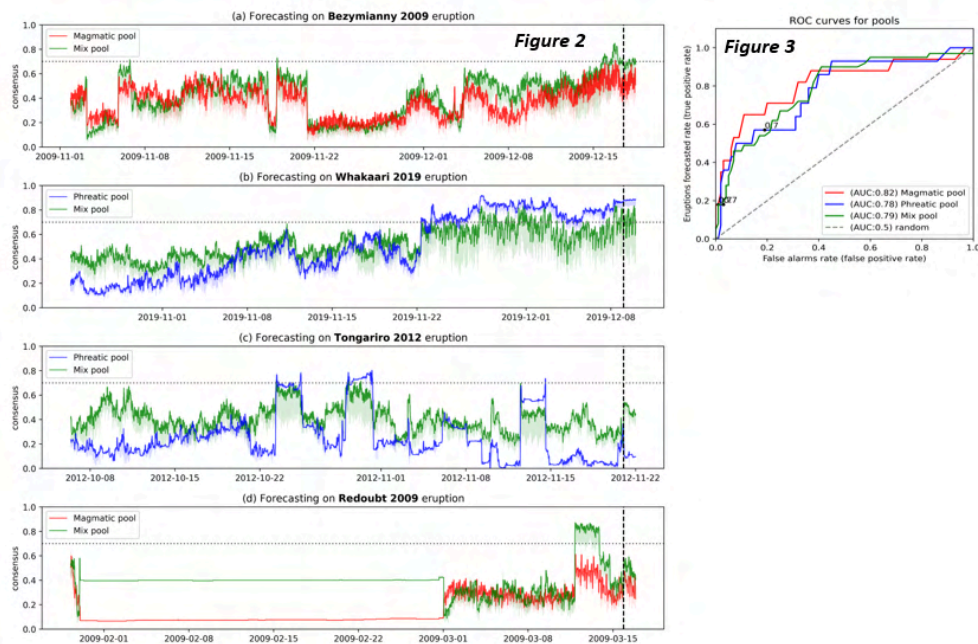
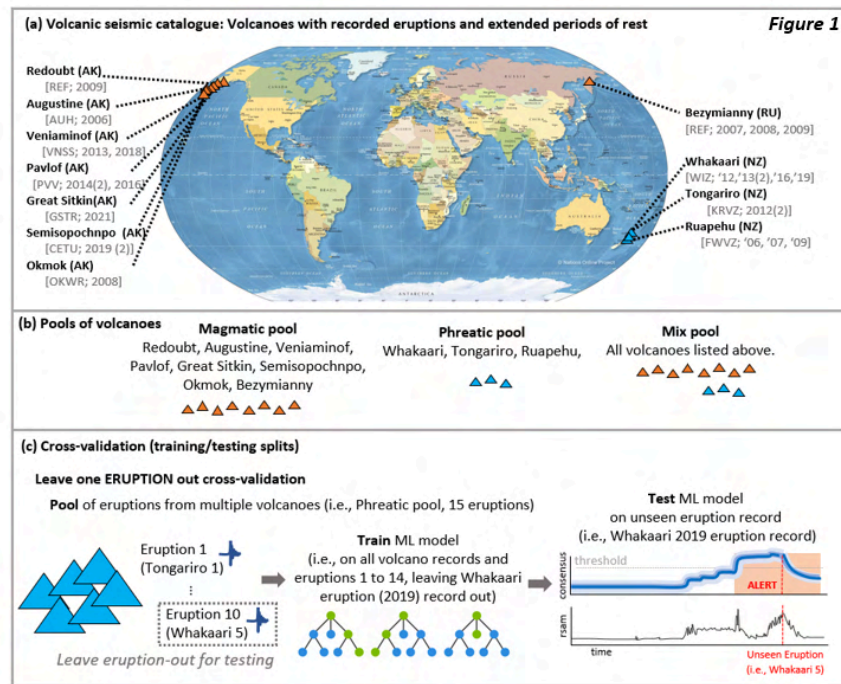


Figura 1. (a) Catálogo de volcanes y erupciones usados en este estudio. (b) Conjuntos de volcanes (pools) agrupados para entrenar modelos generalizados de pronóstico de erupciones. (c) Estrategia de testeo de los modelos entrenados usando validación cruzada (cross-validation). **Figura 2.** Pronóstico para diferentes modelos previo a cuatro erupciones consideradas en el catálogo. Los pronósticos corresponden a los modelos testeados en erupciones que no fueron consideradas en el entrenamiento (out-of-sample). **Figura 3.** Curva ROC (Receiver Operating Characteristic) para los tres modelos entrenados sobre los tres pools (magmático, freático y mixto). La diagonal corresponde a un modelo aleatorio. En la leyenda se indica área bajo la curva, AUC (Area Under the Curve). Cada punto de la curva ROC corresponde a un posible punto de corte (threshold, por ejemplo 0.7) y nos informa su respectiva tasa de verdaderos positivos (sensibilidad, eje Y) y tasa de falsos positivos (1-especificidad, eje X).

2. METODOLOGÍA

Para mayor detalle de la metodología, visite los siguientes artículos listados en las referencias: Demsey et al., 2020 NatComms, Ardid et al., 2022 NatComms, Dempsey et al., 2022 BullVolc y Ardid et al., 2023 JGR.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pools de erupciones

Separamos el catálogo de erupciones y volcanes en varios grupos. Como criterio, utilizamos el tipo de erupción reportada. En este estudio, definimos tres grupos (Figura 1b): el grupo Magmático que contiene volcanes en Alaska y Bezymianny (Kamchatka, Rusia) (Figura 1a). La mayoría comparte un origen tectónico común, región y tipos de erupciones; el grupo freático que contiene erupciones freáticas de los volcanes de Nueva Zelanda Whakaari, Ruapehu y Tongariro (Figura 1a). Además, construimos un pool mixto con todos los volcanes del estudio.

Confiabilidad

La confiabilidad es un aspecto clave del pronóstico, que se refiere a la consistencia y precisión de los valores pronosticados a lo largo del tiempo. En otras palabras, un pronóstico confiable debe proporcionar pronósticos acertados de manera consistente, sin errores significativos ni sesgos. La confiabilidad es importante en el pronóstico porque genera confianza y seguridad en el proceso de pronóstico, permite una mejor planificación y asignación de recursos, y permite la evaluación del rendimiento del pronosticador.

La Figura 2 muestra el rendimiento de los conjuntos de volcanes (pools) en erupciones fuera de muestra (out of sample: respuesta del modelo en una erupción que no fue parte del entrenamiento). Se espera un buen rendimiento cuando el valor de "consenso" aumenta antes de las erupciones (que se pueden definir en función de umbrales, como el de referencia de 0.7 en la Figura 2). Por ejemplo, la Figura 2a muestra que ambos conjuntos, magmático y mixto pronostican de manera aceptable la erupción. Sorprendentemente el conjunto magmático tiene un peor rendimiento en la erupción de Bezymianny, en comparación con el conjunto mixto. Esto indica que la información sísmica adquirida de las erupciones freáticas en el pool mixto ayuda a generar un mejor pronóstico. De manera similar, la Figura 2b muestra que se obtiene buen rendimiento para la erupción de Whakaari en 2019 con el conjunto de freático y el mixto. La Figura 2c muestra un ejemplo de una erupción no pronosticada correctamente por los modelos. La erupción de Tongariro se capturó con un valor de consenso relativamente bajo. Curiosamente, se obtienen valores más altos en las semanas previas al evento para algunos modelos, lo cual consideramos que sigue siendo útil, ya que potencialmente indica el estado activo del volcán (sin embargo, consideramos esto como un caso de falso positivo). En las Figuras 2d, comparamos los rendimientos para la erupción de Redoubt que solo tienen una erupción en sus registros (Figura 1a). Al pronosticar esa erupción, los modelos se entrenan con los datos del conjunto y el registro no eruptivo del volcán. Como muestra la figura, los modelos tienen un rendimiento aceptable. Esto sugiere que es posible la aplicación de modelos de pronóstico a volcanes sin registros eruptivos.

Discriminabilidad

La discriminabilidad también es importante porque mide cuán bien el modelo de pronóstico puede distinguir entre diferentes resultados, como una erupción inminente y un evento no eruptivo. Una alta discriminabilidad indica que el modelo es efectivo para detectar precursores únicos de una erupción, lo que puede ayudar a emitir advertencias confiables y reducir el riesgo para la vida humana y la propiedad. Para probar la discriminabilidad, utilizamos curvas de características de operación del receptor (ROC, por sus siglas en inglés; Receiver Operating Characteristic), que es una representación gráfica del rendimiento de un clasificador o pronosticador, que traza la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) frente a la tasa de falsos positivos (1-especificidad) en diferentes valores de umbral (por ejemplo, 0.7 en Figura 2). Las curvas ROC son importantes al probar pronosticadores porque brindan una evaluación integral del rendimiento del pronosticador en diferentes valores de umbral y permiten visualizar y optimizar el equilibrio entre sensibilidad y especificidad. La Figura 3 muestra las curvas ROC equivalentes para los conjuntos probados en la Figura 2. Todos ellos claramente tienen un mejor desempeño que las curvas aleatorias (diagonales). La Figura 3 indica que el conjunto magmático tiene una leve mejor discriminabilidad (un área bajo la curva más alta, AUC; Area Under the Curve).

4. COMENTARIOS FINALES

Existen diversas posibilidades para investigaciones futuras con el fin de mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos de pronóstico basados en datos. En primer lugar, ampliar el alcance del análisis de precursores considerando períodos de tiempo más largos, características diversas de series temporales u otros tipos de datos ayudaría a ampliar la gama de posibles precursores de erupción. Estos precursores son entradas cruciales para el desarrollo, prueba e implementación de modelos de pronóstico. Con una mayor variedad de precursores, los modelos de pronóstico podrían responder a datos sísmicos y de gas simultáneamente (datos múltiples) o evaluar los dos días previos de actividad dentro del contexto de una evaluación más amplia de cuatro semanas (escala de tiempo múltiple), o utilizar patrones históricos de erupción para ajustar los datos de manera más precisa (Ardid et al., 2023). Esta información luego puede utilizarse para informar planes de gestión de emergencias y estrategias de evacuación, ayudando a minimizar el impacto de las erupciones volcánicas en la vida humana y la infraestructura. El estudio sugiere que el uso de análogos puede ayudar a generalizar los precursores a otros volcanes y abordar las preocupaciones sobre la disponibilidad de datos. El estudio también resalta el potencial del aprendizaje automático en el pronóstico de erupciones volcánicas, especialmente para volcanes con registros eruptivos limitados, y la necesidad de más investigaciones y recopilación de datos para mejorar su efectividad.

Palabras Claves: Pronóstico de erupción volcánica, erupciones magmáticas y freáticas, transfer machine learning.

Referencias:

- Ardid, A., Dempsey, D., Caudron, C., & Cronin, S. (2022). Seismic precursors to the Whakaari 2019 phreatic eruption are transferable to other eruptions and volcanoes. *Nature communications*, 13(1), 2002. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29681-y>.
- Ardid, A., et al. (2023). Using template matching to detect hidden fluid release episodes beneath crater lakes in Ruapehu, Copahue and Kawah Ijen volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2023JB026729>.
- Basualto, D., et al. (2023). Anatomy of a high-silica eruption as observed by a local seismic network: the June 2011 Puyehue–Cordón Caulle event (southern Andes, Chile). *Solid Earth*, 14(1), 69-87.
- Cardona, et al. (2021). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex–Chilean Andes (2012 to 2020). *JVGR*, 420, 107409.
- Christ et al., (2016). Distributed and parallel time series feature extraction for industrial big data applications. 1610.07717.
- Dempsey, D., et al., (2020). Automatic precursor recognition and real-time forecasting of sudden explosive volcanic eruptions at Whakaari, New Zealand. *Nat Comms* 11, 3562.
- Dempsey, D.E., Kempa-Liehr, A.W., Ardid, A. et al.(2022). Evaluation of short-term probabilistic eruption forecasting at Whakaari, New Zealand. *Bull Volcanol* 84, 91. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01600-5>.
- Johnson et al., (2018). Forecasting the eruption of an open-vent volcano using resonant infrasound tones. *GRL*, 45(5), 2213-2220.
- Langer et al., (2011). Detecting imminent eruptive activity at Mt Etna, Italy, in 2007–2008 through pattern classification of volcanic tremor data. *JVGR*. 200, 1–17.
- Newhall, C. et al., (1996). Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines. University of Washington Press Schaefer, J. R. (2011). The 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. *Report of Investigations*, 5, 45.

Variations in B-Value as a precursor tool in silicic volcanic systems: The case of the Laguna del Maule volcanic complex

Daniel A. Basualto Alarcón¹, Cristian Farías², Jonathan Lazo-Jil³, Pablo Gonzales³, Fabián Valdés³

(1) Universidad de La Frontera (UFRO), Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Francisco Salazar #01145, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica de Temuco (UCT), Departamento de Geología y Obras Civiles, Ingeniería, Rudecindo Ortega #02950, Temuco, Chile

(3) Universidad de La Frontera (UFRO), Departamento de Ciencias Físicas, Facultad de Ingeniería, Francisco Salazar #01145, Temuco, Chile

Introduction

Laguna del Maule Volcanic Complex (LDM, Southern Andes of Chile) has been experiencing large rates (ca. 30 cm/yr) of surface uplift as detected since 2005 by satellite geodetic measurements (Feigl et al. 2014). The deformation affects an area of 500 km² centered on the western shore of the lake basin. This area includes 40 km³ of rhyolite erupted since the last glaciation (ca. 20 ka) and as late as ca. 2000 ka from at least 24 vents distributed around the lake basin (Andersen et al., 2019). The source of uplift has been modeled as an opening sill at a depth of 5 km (Feigl et al., 2014), however, Le Mével et al. (2016) introduce analytic solutions for a dynamic spheroid model of magma injection in order to explain nonlinear evolution of uplift. The results from modeling the deformation field also indicate two distinct episodes of increased pressure (2005–10 & 2016–20) feeding an ellipsoidal reservoir under the lake basin.

Methodology

Monitoring in real time active volcanoes involves the use of a series of physical parameters, however, the existence of post-processing data, such as b-value, has contributed successfully to the discussion and prediction of eruptions, especially if considering rhyolite magmas (high viscosity). Active silicic volcanoes such as Mount St. Helens (1988–1996), Mount Pinatubo (1991), Soufrière Hills volcano (1997), Chaitén (2008) and Cordón-Caulle (2011) have been recorded periodic cycles of seismicity linked with ground deformation before erupting (Michaut et al., 2013), promoting the b-value analysis. If we consider the seismic magnitude distribution proposed by Gutenberg-Richter ($\log N = a - bM$), where b is obtained by calculating the slope of the frequency-magnitude distribution. The value of b represents the relative distribution of magnitudes and has an inverse relationship to the differential stress ($b = 1/\Delta\sigma$ & $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$; Scholtz 2015). However, this tool is still controversial, as the b-value is highly dependent on the completeness magnitude (M_c ; Fig. 2A; blue slope). For this reason, we propose working with this new method (van-der-Elst 2021), as b positive [β^+] is calculated from the distribution of positive differences between successive magnitudes of earthquakes, which are described by a double-exponential (Laplace) distribution and derive the maximum likelihood estimate of b. We calculated the temporal β^+ of the VT seismicity that was located within the LDM and its surroundings. With a total of 6,417 located events, we have a dataset that is large enough to calculate the temporal variations of b-value with confidence. For this, we used a moving window of 150 events, with an overlapping of 90%. Finally, Basualto et al. (2023) addresses this issue using the " β^+ " as an indicator of stress linked with the Cordón-Caulle explosive eruption.

Results and discussion

According to the magnitude distribution, high values ($\beta^+ > 1$) are associated with swarms of low-magnitude earthquakes, while low values ($\beta^+ < 1$) are linked to earthquakes exceeding the typical magnitudes. In the context of the temporal β^+ values obtained in the LDM, the following observations can be made: between 2012 and 2017, β^+ remained stable ($\beta^+ = 1.1 \pm 0.1$). However, at the beginning of 2018, a series of VT-type swarms caused a gradual decrease in β^+ , reaching its minimum value (0.8) in July 2018. This seismic activity was located southwest of the LDM, showing a reactivation of the intersection between the Laguna Fea [NW] and Tronozo [NNE] faults, suggesting a magma intrusion. One month later (early Sept 2018), a rapid increase in β^+ was observed (1.6), indicating a reactivation of these two fault systems, but showing a larger areal distribution of seismic location. During the following two year, the values of β^+ continued to decrease until reaching a historical minimum (March 2020; $\beta^+ = 0.75$). Finally, since 2021, along with a clear increase in the number of earthquakes, as well as, their accumulated energy, the temporal values of β^+ have started to oscillate. It was achieved identifying at least 5 new periods where new magma intrusions were possibly occurred, followed by subsequent stress transfer to the local faults surrounding LDM. The six significant oscillations of the β^+ (0.8 to 1.3) are consistent with important variations in stress within the volcanic system, providing clear evidence of "instability" since 2021. This extreme condition was confirmed on 2023-03-30 17:33:08.7 UTC with the arrival of an Mw 6.2 (26 km depth) earthquake located 275 km W to the LDM. This tectonic earthquake triggered the largest swarm of VT-type earthquakes in these 11 years of monitoring, recording nearly 3,000 events during the following 24 hrs. After that, the LDM changed the volcanic alert to yellow.

Keywords: Laguna del Maule, volcanic unrest, b positive.

Financing: CIVUR-39° Centro Interactivo Vulcanológico de La Araucanía, Universidad de La Frontera, project No. FRO2193 of the Desarrollo de Actividades de Interés Nacional (ADAIN), Ministerio de Educación, Gobierno de Chile.

Acknowledgments: We thank the Observatorio Vulcanológico de Los Andes del Sur OVDAS and SERNAGEOMIN for facilitating the data collection required to carry out this research.

References:

- Andersen, N. L., Singer, B. S., & Coble, M. A. (2019). Repeated rhyolite eruptions from heterogeneous hot zones embedded within a cool shallow magma reservoir. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. doi.org/10.1029/2018JB016418.7

- Basualto, D., Tassara, A., Lazo-Gil, J., Franco-Marin, L., Cardona, C., San Martín, J., Gil-Cruz, F., Calabi-Floddy, M., Fariás, C., (2023). Anatomy of a high-silica eruption as observed by a local seismic network: the June 2011 Puyehue–Cordón Caulle event (southern Andes, Chile). *Solid Earth* 14, 69–87. <https://doi.org/10.5194/se-14-69-2023>.
- Feigl, K. L., LeMével, H., Ali, S. T., et al. (2014). Rapid uplift in Laguna del Maule volcanic field of the Andean Southern Volcanic Zone (Chile) 2007–2012. *Geophysical Journal International*, 196(2), 885–901. doi.org/10.1093/gji/ggt438.
- Le Mével, H., Gregg, P. M., & Feigl, K. L. (2016). Magma injection into a long-lived reservoir to explain geodetically measured uplift: Application to the 2007–2014 unrest episode at Laguna del Maule volcanic field, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 6092–6108. <https://doi.org/10.1002/2016JB013066>.
- Le Mével, H., Córdova, L., et al (2021). Unrest at the Laguna del Maule volcanic field 2005–2020: renewed acceleration of deformation. *Bulletin of Volcanology* 83(6), ngeo1928 <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01457-0>.
- Michaut, C., Ricard, Y., Bercovici, D. et al.(2013). Eruption cyclicity at silicic volcanoes potentially caused by magmatic gas waves. *Nature Geosci* 6, 856–860. <https://doi.org/10.1038>.
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1399–1402. <https://doi.org/10.1002/2014GL062863>.
- van der Elst, N. J. (2021). B-positive: A robust estimator of aftershock magnitude distribution in transiently incomplete catalogs, *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 126, e2020JB021027, <https://doi.org/10.1029/2020JB021027>.

Eruption Forecasting Model for Copahue Volcano (Chile/Argentina) Using Seismic Data and Machine Learning

Leoncio Cabrera¹, Alberto Ardid², Sergio Ruiz¹, Iván Melchor³, David Dempsey², Carlos Cardona⁴, Shane Cronin⁵

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(2) University of Canterbury, New Zealand

(3) Universidad Nacional de Río Negro, Argentina

(4) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), OVDAS, Chile

(5) University of Auckland, New Zealand

Sudden and unexpected volcanic eruptions are a major cause of fatalities at volcanic tourist destinations and nearby populated areas. Recent examples, such as the Whakaari eruption in New Zealand in 2019 (22 fatalities) and the Mount Ontake eruption in Japan in 2014 (60 fatalities), have highlighted the necessity for accurate short-term eruption predictions. However, existing volcano alert systems rely mostly on heuristic methods and suffer from inadequate updates due to human involvement. In this study we address these challenges by implementing a forecasting prototype in the Copahue volcano, which is an active polygenetic stratovolcano of basaltic-andesitic composition located in the intra-arc region of Southern Andes Volcanic Zone (on the border of Chile and Argentina). This forecasting prototype has been developed for the Whakaari volcano (New Zealand), and employs a structured machine learning approach that enables the detection of eruption precursors using real-time seismic data. In particular, the machine learning pipeline combines precursor extraction from volcano tremor data, classification modeling of eruption imminence, and a decision model that issues eruption alerts. Both Whakaari and Copahue volcanoes are thought to have developed hydrothermal systems given their records of phreatic eruptions, mostly unanticipated, and the presence of crater lakes. We are implementing a model to issue short-term alerts indicating an elevated likelihood of eruption. To this aim, we are testing the model through cross-validation using yearly seismic records from a triaxial broad-band station (20 s) located 4.5 km eastward from the crater of the volcano during 2020, which contain 3 to 4 small eruptive events, in order to demonstrate that the model is able to forecast an impending eruption. If successful, the findings will advocate for the implementation of real-time forecasting models at active volcanoes such as Copahue and potentially extending to other volcanic regions in Chile.

Palabras Clave: Volcanic Monitoring, Machine Learning, Eruption Forecasting, Copahue Volcano.

Financiamiento: - Programa de Riesgo Sísmico (PRS) de la Universidad de Chile- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, FONDECYT Regular 1200779.

Volcán Villarrica: caracterización de actividad superficial en tiempo real y cuasi real e implicancias para la evaluación y comprensión del peligro del volcán más riesgoso de Chile

María Angélica Contreras Vargas¹, Gabriela Pedreros Delgado¹, Lizette Bertin¹, Constanza Perales M.¹, Maira Figueroa¹, Daniel Bertin¹, Oscar Alberto Valderrama Cayuman¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería

Los volcanes de conducto abierto son objeto de particular interés debido a que constituyen una ventana hacia el sistema profundo, dando luces para la comprensión de los procesos físicos y químicos bajo la superficie. Sin embargo, pronosticar su comportamiento sigue siendo un desafío. En particular en el caso del volcán Villarrica la caracterización en tiempo real y cuasi real de su actividad superficial demanda incrementar los esfuerzos realizados para su monitoreo. Villarrica es el volcán chileno con mayor riesgo específico, con un nivel de exposición de la población que ha ido en aumento en los últimos años, donde destacan factores tales como turismo, población viviendo en zonas de muy alto peligro, presencia de infraestructura crítica, entre otros.

Desde el último ciclo eruptivo ocurrido el 2015, al menos 6 incrementos en el nivel de alerta (amarilla y naranja) ha decretado el SNGM debido al aumento de la actividad superficial y de parámetros de monitoreo. En paralelo, de la mano de la tecnología, nuevas técnicas de vigilancia que incluyen el monitoreo petrológico y la utilización de sensores remotos han avanzado a pasos agigantados, facilitando la observación y caracterización del material eruptado y cambios morfológicos en tiempo real y cuasi real, además de una más elocuente transmisión de los peligros asociados.

Los insumos utilizados para el monitoreo superficial de la actividad incluyen sets de imágenes satelitales de muy alta resolución espacial y alta resolución temporal, modelos de elevación digital en el área del cráter, sobrevuelos, vuelos de vehículos aéreos no tripulados, cámaras IP y térmicas, y análisis químicos de piroclastos emitidos.

Los resultados evidencian cambios morfológicos a nivel de cráter, con directa influencia en la distribución de productos en superficie. Desde el año 2016 la profundidad del *vent* ha fluctuado entre 150 y 70 m, se ha observado actividad vulcaniana y estromboliana predominante, con alcances de piroclastos de hasta 9 km (ceniza) y 1 km durante periodos de actividad estromboliana como el del periodo 2022-2023. Desde el segundo semestre de 2022 a la fecha, la edificación de un cono de piroclastos se ha producido como consecuencia de la alta producción de explosiones estrombolianas. A partir de observación remota y directa se ha identificado una dinámica del *vent* que incluye somerización de la porción fundida y cambios en su temperatura, desplazamientos horizontales, así como cambios morfológicos evolucionando de forma circular a fisural. Además, explosiones estrombolianas presentaron variaciones en su dinámica como en la distribución de los productos asociados. Respecto a este último, influyen fuertemente los cambios en la posición y morfología *vent* y disponibilidad de gas, variación del ángulo de eyección entre 90 y 40 grados (con respecto a la horizontal), velocidades de emisión del orden de 30-60 m/s y alturas que alcanzaron máximos de 300 m desde el nivel del cráter. La frecuencia máxima de explosiones alcanzada fue de 32 explosiones por hora. Con ello, la mayor concentración de bloques balísticos ocurrió dentro del perímetro de los 500 m. No obstante, se observaron bloques aislados que alcanzaron el kilómetro de distancia al centro del cráter lo que definió para este periodo un perímetro de posible impacto consecuente a las observaciones realizadas.

La caracterización en detalle y en tiempo real de los cambios ocurridos a nivel de cráter durante periodos con incrementos de actividad, es un insumo no sólo complementario a las técnicas clásicas de monitoreo, sino también un producto clave para la evaluación del peligro y comunicación de los mismos.

Palabras Clave: Villarrica, Peligro volcánico, conducto abierto, monitoreo volcánico, piroclastos balísticos.

Modelo de desarrollo del ciclo eruptivo 2022-2023 volcán Lascar (Zona Volcánica de los Andes Central, Chile)

Ayleen Gaete Rojas¹, Juan San Martín¹, Gabriela Pedreros¹, Francisco Bucchi¹, Lizette Bertin¹, María Angélica Contreras¹, Gabriela Velásquez Vargas¹, María Loreto Córdova¹, Cristian Mardones¹, Luis Franco Marín¹, Carlos Cardona¹, Álvaro Amigo¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (Sernageomin), Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Avenida Rudecindo Ortega 03850, Temuco, Chile

El volcán Lascar, localizado en la región de Antofagasta, es uno de los más activos de la Zona Volcánica Central de los Andes (CVZA por su sigla en inglés). La última gran erupción de este volcán (VEI 4) fue registrada en abril de 1993, siendo la culminación de un proceso desarrollado en 4 fases y 9 años, caracterizadas por la extrusión y subsidencia de domos de lava (Matthews et al., 1997).

Desde el año 2010, el volcán Lascar posee una red instrumental multiparamétrica y permanente, que considera el monitoreo en tiempo real de la actividad volcánica: sísmica, geoquímica, deformación y observaciones visuales. Gracias al despliegue de esta red, desde abril de 2013 se han detectado variaciones cíclicas principalmente en la ocurrencia de sismicidad de Largo Periodo (LP), incandescencia nocturna y emisión de SO₂. Las variaciones de estos parámetros coinciden con cambios en las anomalías térmicas detectadas por imágenes satelitales y en su conjunto, han sido asociadas con la actividad precursora de erupciones explosivas menores que ocurren con una frecuencia aproximada de cada 3 años.

El 10 de diciembre de 2022, el volcán Lascar evidenció un nuevo proceso eruptivo caracterizado por actividad freatomagmática con la emisión de una columna eruptiva vigorosa de entre 6 y 8 km. De acuerdo con las características eruptivas y la temporalidad, se observa que la erupción de diciembre no responde al comportamiento cíclico anteriormente descrito. Además, variaciones posiblemente asociadas con esta erupción e inconsistentes con los ciclos de actividad anteriores (alzamiento del piso cratérico en ~30 m y posterior evolución hacia un mecanismo de subsidencia) son indicadores de un cambio en las condiciones del sistema. Estos cambios fueron acompañados por actividad sísmica abundante, variada, y muy energética, así como también de variaciones en la emisión de gases SO₂ y anomalías térmicas. La disposición de esta información, junto con el uso de un enfoque de análisis multiparamétrico ha permitido desarrollar un modelo de la evolución del proceso eruptivo en 4 fases: Fase-0, iniciada por la explosión de diciembre de 2022, incremento en la actividad sísmica VT (volcano-tectónica) y LP y alzamiento del piso cratérico; Fase-1, transición entre alzamiento y subsidencia acompañada por sismos energéticos LP y VT; Fase-2, de obstrucción por subsidencia caracterizada por la aparición de sismos tipo tornillo (TO) y baja emisión de SO₂; Fase-3, de obstrucción parcial, donde los sismos TO disminuyen su ocurrencia y la emisión de gases se vuelve más evidente.

A la fecha de envío de este resumen, el volcán Lascar se encuentra en alerta técnica amarilla, sin desestimar el desarrollo de futuras fases, ni tampoco descartar la posibilidad de la ocurrencia de un evento eruptivo de mayor escala.

Palabras Clave: volcán Lascar, análisis multiparamétrico, ciclo eruptivo.

Análisis sismo-acústico del aumento de actividad del volcán Villarrica durante noviembre 2022- abril 2023, y su comparación con la actividad que precedió la erupción de 2015

José Luis Palma Lizana¹, Daniel A. Basualto Alarcón²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario S/N, Concepción, Chile

(2) Universidad de la Frontera, Dirección de Investigación y Postgrado, Francisco Salazar # 01145, Temuco, Chile

El volcán Villarrica es el volcán más activo de Chile, y uno de los pocos volcanes en el mundo que presenta un lago de lava muy cerca de la superficie. La persistente desgasificación y actividad estromboliana que se desarrolla en el cráter genera señales sísmicas y acústicas, las que son utilizadas para monitorear el volcán. Dicho monitoreo se centra específicamente en cuantificar el nivel de la actividad explosiva, variaciones en el nivel del lago de lava, y características superficiales como la desgasificación del magma.

Desde fines de octubre de 2022 y durante los meses de noviembre 2022 a abril 2023 se observó un evidente aumento de la actividad del volcán Villarrica, con observaciones que corroboraron el ascenso sistemático del lago de lava localizado al interior del cráter, aumento de la actividad explosiva, formación/destrucción de terrazas, y la acumulación de pequeños conos de escoria anidados al interior del cráter. Toda esta actividad estuvo acompañada por la eyección esporádica de bombas fuera del cráter, pudiendo ser evidenciadas a simple vista durante la noche. Esta actividad llevó a las autoridades a sugerir un cambio de alerta volcánica, el que fue declarado por SERNAGEOMIN el 08-11-2022. Un arreglo de infrasonido de baja apertura, ubicado a menos de 4 km del cráter, registró las variaciones en la actividad superficial del volcán Villarrica durante todo el período de interés. Esta actividad se caracterizó por sus variaciones en el número e intensidad de las explosiones, con cambios significativos ocurriendo a intervalos de 12-48 horas. La actividad sísmica fue registrada tanto por una red temporal desplegada por la Universidad de La Frontera [UFRO] como por estaciones del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), que forma parte de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN; N°:AS004T0005733). El registro sísmico durante el período estudiado estuvo marcado predominantemente por la detección sistemática de sismos tipo Largo Período (LP), con promedios de 1000 sismos diarios y valores máximos de Desplazamiento reducido (Dr) de 137 cm² como el registrado el 19 de marzo de 2023. El análisis combinado del infrasonido y sismicidad registrados permitieron describir en detalle las características de los cambios de actividad que el volcán experimentó durante este período.

Uno de los resultados importantes de este análisis indica que las características de los procesos de desgasificación superficial observados en el Villarrica, y su evolución, fueron distintos a los observados previos a la última erupción ocurrida en 2015. Las señales evidencian un ascenso errático y discontinuo de gases que llegan a la superficie del lago de lava, reflejando cambios en la dinámica de convección magmática al interior de la columna de magma. Estos procesos generaron además variaciones en las propiedades intrínsecas del magma durante el ascenso hacia la sección más superficial del sistema de conductos que alimenta el lago de lava. En contraste, las señales sismo-acústicas de febrero-marzo 2015 reflejaron una desgasificación más continua y de mayor magnitud, con un claro punto de inflexión el 27 de febrero; desde este punto la actividad evolucionó mostrando una disminución en la profundidad del lago de lava, y un aumento de la actividad explosiva que culmina en la erupción del 3 de marzo de 2015. La actividad de 2023 nunca alcanzó las características de desgasificación observadas en 2015.

El análisis sismo-acústico realizado en este trabajo permite discutir e interpretar las razones del por qué el aumento de la actividad registrado en 2023 no culminó en una erupción. La evidencia que aquí se presenta sugiere que la intensidad de la inyección de magma rico en volátiles fue menor que durante 2015 y, en consecuencia, insuficiente para generar grandes fuentes de lava o un ascenso de la columna de magma a un nivel cercano al borde del cráter. Este trabajo muestra que el análisis combinado de datos sismo-acústicos puede ser importante en la comprensión de la actividad del volcán Villarrica, y en la evaluación de posibles escenarios eruptivos.

Palabras Clave: Villarrica, sismicidad, infrasonido, lago de lava, estromboliana.

Financiamiento: ANID, FONDEF IT21I0086.

Agradecimientos: Agradecimientos al Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) por proveer datos de las estaciones sísmicas ubicadas alrededor del volcán Villarrica, solicitud N°:AS004T0005733.

Ciclo eruptivo 2016-2022 del Complejo volcánico Nevados de Chillán: registro completo de la evolución de sus dinámicas superficiales a partir del monitoreo multiparamétrico en tiempo real

Gabriela Pedreros Delgado¹, María Angélica Contreras Vargas¹, Maira Figueroa Vera¹, Claudia Bucarey¹, Loreto Córdova¹, Juan José San Martín¹, Carlos Cardona¹

(1) SERNAGEOMIN, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Observatorio Volcanológico de Los Andes del Sur, Rudecindo Ortega #03850, Temuco, Chile

El Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh) (36,867°S -71,377°W) se ha caracterizado en tiempos históricos por ciclos eruptivos de larga duración, planteando un desafío para la reconstrucción e interpretación de su historia eruptiva y evolución de sus procesos. El ciclo más reciente inició el año 2016 y se extendió hasta octubre del 2022, siendo monitoreado multiparamétricamente y en tiempo real durante todo su desarrollo, lo que otorga una oportunidad única de registro y análisis.

Desde el punto de vista de actividad superficial se reconocen fases explosivas, efusivas, mixtas y de reposo de diferentes dimensiones. Incluye columnas eruptivas de hasta 3,6 km de altura con alto contenido de piroclastos, 8 flujos de lava denominados como L1 a L8 en orden cronológico y 4 domos entre 63,72 y 67,34% SiO₂; y corrientes de densidad piroclásticas de hasta 1,9 km de alcance. Si bien sus fases han sido acotadas en términos de afectación a la población, la vigilancia volcánica se ha visto desafiada por la alta variabilidad de sus procesos y el traslape de posibles precursores con la actividad en curso.

Este ciclo eruptivo se puede caracterizar por al menos 9 etapas desde el punto de vista de actividad superficial, emitiéndose un volumen total de flujos de lava y domos de 12,7 millones de m³ con una tasa eruptiva promedio de 0,18 m³/s y máxima de 0,86 m³/s y una velocidad máxima de avance de 3,5 m/h durante la emisión del flujo de lava L6, medidos a partir del procesamiento de modelos de elevación digital e imágenes satelitales de alta resolución. Paralelamente, desde las cámaras de vigilancia del Observatorio Volcanológico de Los Andes del Sur se registran al menos 46 eventos explosivos con altura de columna superior a 2 km sobre el nivel del cráter, caracterizándose entonces por eventos o periodos eruptivos con IEV 1-2.

En el presente trabajo se exponen los principales hitos de cada fase y cambios de dinámica superficial integrando los resultados de análisis químico de muestras de flujos de lava y domos, la evolución de velocidad y tasa eruptiva de su emplazamiento calculados desde el procesamiento de modelos de elevación digital de alta resolución y los análisis de componentes de cenizas emitidas durante explosiones de las distintas etapas. De este modo, se describe la evolución cronológica del ciclo eruptivo destacando los principales eventos superficiales y su relación primaria con los precursores sísmicos, geodésicos y geoquímicos.

El registro eruptivo realizado a partir del monitoreo multiparamétrico en tiempo real es una oportunidad única para comprender el desarrollo de los procesos que originan los productos y depósitos previos de un sistema volcánico, permitiendo reinterpretar las actividades del pasado y ampliar la discusión sobre posibles escenarios eruptivos.

Palabras Clave: Monitoreo volcánico, Nevados de Chillán, Erupciones recientes, Ciclos eruptivos extensos

Zonas de alto peligro de remociones en masa región de Coquimbo

Cristina Estefanía Brantt Hidalgo¹⁻², Natalia Garrido Urzua¹⁻²

(1) SERNAGEOMIN, Unidad de Peligros y Ordenamiento Territorial, Santiago, Chile

(2) ACHIGEO

El presente trabajo se enmarca tras los resultados de dos trabajos realizados por SERNAGEOMIN: Mapa de peligro de remoción en masa en la región de Coquimbo-sector norte (Alfaro *et al.*, 2018), el cual abarca principalmente la provincia del Elqui, y el mapa peligro de remociones en masa en el sector sur de la región de Coquimbo (Brantt *et al.*, 2021), que abarca las provincias de Limarí y Choapa; ambos enfocados a identificar susceptibilidad de remociones en masa en la zona para proporcionar a la población, instituciones y autoridades, un primer atisbo de las condiciones de estos peligros en la zona, para posteriormente poder realizar estudios de detalle en estos sectores. Dado que ambos trabajos se realizaron bajo metodologías muy similares (difiriendo en detalles) fue posible la correlación de ambos, permitiendo de esta forma visualizar un mapa completo para la región de Coquimbo. Tras lo anterior se pudieron determinar zonas con mayor susceptibilidad de procesos de laderas y flujos, interceptando con zonas urbanizadas lo que posibilitó de cierta forma determinar un grado de peligrosidad alto para aquellas zonas con alta susceptibilidad.

Con estos antecedentes se reconocieron puntos críticos, algunos de los cuales coinciden con puntos identificados por recurrencia de eventos por parte del servicio protección civil de algunas comunas. Se diferenciaron los eventos que afectarían zonas pobladas de aquellos que afectarían la conectividad (rutas/caminos) para efectos de mejorar la identificación de responsabilidades comprometidas.

En ese sentido, para la provincia del Elqui se identificaron al menos 18 zonas pobladas afectadas por remociones en masa de tipo flujos de detritos para la provincia del Limarí 23 y para provincia de Choapa 23. Para eventos de flujos que afectan conectividad se identificaron al menos 8 zonas en la provincia del Elqui, 4 en la provincia del Limarí y 2 en la provincia de Choapa. Para caída y deslizamientos en zonas pobladas al menos 7 zonas en la provincia del Elqui, 14 en la provincia del Limarí y 4 en la provincia de Choapa. Para eventos de caída y deslizamientos que afectan conectividad en la provincia del Elqui al menos 9 zonas se ven afectadas, en la provincia del Limarí 8 y en la provincia de Choapa 6.

Ejemplos relevantes de flujos que afectan zonas pobladas corresponden a Quebrada Seca, Punitaqui y Canela, y que afectan conectividad corresponden a ruta D-205 (sector Islón), D-595 (Pichasca) y D-37E (Tilama). Ejemplos relevantes de caída de rocas y deslizamientos que afectan zonas pobladas corresponden a Paihuano, El Tayán y Cerro Pajaritos, y que afectan conectividad corresponden a ruta 5 (cuesta Pajonales), ruta D-41 (Paso Agua Negra), y ruta D-71 (cuesta la Viuda).

Para estas zonas las recomendaciones para las autoridades e instituciones son evitar instalación de viviendas y edificaciones críticas y fomentar reubicación de viviendas existentes en estas zonas. Para los sectores asociados a conectividad se recomienda la instalación de señalética, medidas de mitigación adecuadas y mantención frecuente.

Respecto a los IPT, la región presenta dos PRI (Elqui y Limarí) que incluyen la zonificación de riesgo por remoción en masa, las cuales tienen por objeto limitar la construcción de proyectos habitacionales en estas zonas y al menos 6 PRC (Coquimbo, La Serena, Ovalle, Río Hurtado, Paihuano y Monte Patria) que incluyen restricción por área de riesgo de remoción en masa. Sin embargo, el Art. 2.1.17 de la OGUC permite la construcción de inmuebles en estas áreas, cuando el solicitante presenta un Estudio Fundado de Riesgos y resulta visado por Sernageomin, sin atender a que existen procesos de remoción en masa que por sus características no pueden ser mitigadas. Sumado a lo anterior, los IPT en general, no contemplan la totalidad del territorio sino sólo zonas urbanas, de extensión urbana o algunas zonas rurales en los PRI, dejando sectores del territorio sin regulación o restricción ante la amenaza de remociones en masa. Por esto resulta relevante que el trabajo presentado sea incorporado al Plan de Ordenamiento Territorial de la región.

Palabras Clave: Coquimbo, Remoción en Masa.

Agradecimientos: A Sernageomin, en especial a la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial y a la Regional de Coquimbo.

Referencias:

- Alfaro, A.; Brantt, C.; Pantoja, G. 2018. Peligro de remociones en masa en la región de Coquimbo-sector norte. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-18-68: 52 p.
- Brantt, C.; Pantoja G.; Muñoz, A. 2021. Peligro de remociones en masa en el sector sur de la región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-88:107p.

Geología urbana en zonas costeras de Chile, ¿cuál es la población expuesta a una amenaza de tsunami?

Tamara Cisternas¹, Camilo Sanchez¹, Cristina Ortega¹, Sergio García¹, Benjamín Castro²

(1) Universidad Mayor, Geología, Facultad de Ciencias, Av. Manuel Montt #367, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago, Chile

La geología en las ciudades costeras de Chile ha modelado el desarrollo de centros urbanos y las actividades económicas preponderantes en ellos, principalmente como resultado del gran historial sísmico y el desarrollo de Tsunamis. En particular, la geomorfología del lugar y la definición de zonas de inundación, juegan un papel fundamental en la comprensión de los riesgos asociados. En este contexto, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) a través del proyecto de elaboración de Cartas de Inundación por Tsunamis (CITSU), ha puesto a disposición de la comunidad la cartografía de 69 localidades costeras de Chile. Por medio de este proyecto, el SHOA ha definido los niveles de inundación máximos esperados ante la ocurrencia de un Tsunami según simulaciones numéricas COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model). A pesar de que esta información se encuentra publicada en canales oficiales de la Armada de Chile, se desconoce el número de personas que podrían verse afectadas por un tsunami y su integración con los principales rasgos geomorfológicos locales asociados. Es por esto que esta investigación integra información multidisciplinar que permita definir el número de personas que se deberían movilizar en caso de que se necesite evacuar una zona de inundación.

Las zonas de estudio propuesta en esta investigación son Iquique, Antofagasta, Algarrobo, Valparaíso, Pichilemu, Constitución y Talcahuano. Los datos fueron obtenidos de páginas oficiales como <http://www.shoa.cl/php/citsu.php> y www.ine.cl con la finalidad de cuantificar la densidad poblacional según áreas de inundación. Además, se caracterizaron los principales rasgos geomorfológicos de cada localidad según antecedentes publicados previamente. Los resultados preliminares, reportaron que existen áreas densamente urbanizadas en zonas de inundación, sin medidas de control ni prevención, así como también intervenciones urbanísticas locales como desarrollos urbanos sobre humedales y dunas, lo que podría alterar la energía de inundación en caso de que se gatille un tsunami.

Las conclusiones de esta investigación permitirán contribuir al perfeccionamiento de sistemas de alerta temprana que puedan crear acciones de prevención ante emergencias eficientes para poder proporcionar la protección necesaria a la población frente a las inundaciones que provoca este fenómeno.

Palabras Clave: Geomorfología Costera, Tsunami, Gestión de Riesgo, SHOA.

Los peligros volcánicos en la planificación urbana en Chile

Carolina Geoffroy Gómez¹, Isabella Ciocca Tobar¹

(1) Xterrae Geología

La planificación territorial busca analizar y gestionar el desarrollo y expansión de un determinado territorio, mediante la regulación del uso, ocupación y transformación de este (Márquez Poblete & Veloso Pérez, 2021). En Chile existen Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) de carácter normativo e indicativo (Espinace Vidal, 2020), siendo los Planes Reguladores Comunales (PRC) de carácter normativo y los Planes de Desarrollo Comunal (PLADECO) de carácter indicativo.

La planificación urbana, urbanización y construcción están reguladas por las normas vigentes establecidas en la Ley General de Urbanismo (LGUC) y Construcciones junto con su Ordenanza (OGUC). Los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) que regulan las áreas urbanas en Chile son los PRC, los que deben incluir un "Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental" (ERPA) que permita definir áreas de restricción, que pueden ser «zonas no edificables» o «áreas de riesgo», de acuerdo con las disposiciones contempladas en el artículo 2.1.17. (artículo 2.1.10 de la OGUC).

Por otro lado, el país se ubica en un margen activo de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, y entre las placas Antártica y Sudamericana, ambas zonas separadas por la subducción de la Dorsal de Chile a los ~47°S, dando origen al arco volcánico de la Cordillera de los Andes. A lo largo de este arco se reconocen numerosos centros eruptivos, de los cuales 92 se consideran geológicamente activos (RNVV-Sernageomin, 2020). En Chile han ocurrido más de 170 erupciones desde el siglo XX (Global Volcanism Program, 2013), entre las que destacan en los últimos años, por sus impactos, alcance y explosividad, la erupción del volcán Chaitén en 2008, la del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle en 2011 y la del volcán Calbuco en 2015.

Para este estudio, se revisó la nomenclatura relacionada a peligros volcánicos en el marco regulatorio y el estado de la planificación territorial para comunas que se encuentran en un radio de 50 km de cinco de los centros volcánicos más activos del país (volcanes Láscar, Villarrica, Chaitén, Hudson y el Complejo Volcánico Nevados de Chillán), para analizar cómo se abordan los peligros volcánicos en la planificación territorial a nivel comunal en Chile. A partir de esto fue posible reconocer las diferencias que existen entre los instrumentos, tanto en su nivel de actualización, como en la mención que realizan de los peligros de origen natural y, en particular, los peligros volcánicos.

Se revisaron los IPT de un total de 25 comunas, de las cuales una rodea al volcán Láscar, diez al Complejo Volcánico Nevados de Chillán, ocho al volcán Villarrica, tres al volcán Chaitén y tres al volcán Hudson. Fueron 95 los IPT analizados, que se dividen entre instrumentos de carácter normativo e indicativo. Entre los normativos se encuentran: nueve LU, cinco PS, una modificación de PS, 25 PRC, 15 modificaciones de PRC, un PRI y dos modificaciones del PRI. Los IPT indicativos corresponden a 37 PLADECO y una base técnica para licitación de actualización de PLADECO.

En general, el peligro volcánico es incorporado con mayor frecuencia en instrumentos indicativos, mientras que en instrumentos normativos estos no se mencionan. Del total de comunas, el 36% no posee un PRC vigente, un 48% posee PRC vigente de más de 10 años de antigüedad y un 8% posee PRC vigente de antigüedad menor a 10 años. Asimismo, el 50% de los IPT revisados se refieren a peligros de origen natural presentes en la comuna correspondiente. La mención a estos peligros se manifiesta como zonas de restricción o áreas de riesgo de los instrumentos normativos, y como identificación de los riesgos/peligros en los instrumentos indicativos. De estos, el 28% menciona los peligros volcánicos en la comuna, y se reconoce una tendencia a incluirlos mientras más recientes son los instrumentos, aunque esto varía entre centros eruptivos y comunas.

Aunque se identifica que los IPT normativos carecen de suficiente información sobre peligros volcánicos, se destaca la incorporación de estos en los PLADECO que, aunque no son legalmente vinculantes, ayudan a orientar el desarrollo de las comunas.

Entendiendo la planificación como una herramienta para reducir el riesgo de desastres, es imperativa la necesidad de realizar actualizaciones periódicas de los IPT en zonas cercanas a peligros volcánicos, incorporando la información técnica disponible sobre los volcanes cercanos y así disminuir la exposición de la población e infraestructura a estos peligros. Además, se reconoce la necesidad de mejorar la definición de peligros volcánicos en la normativa chilena y de incorporar mapas de riesgo, además de los mapas de amenaza, de acuerdo a los lineamientos de la nueva Ley SINAPRED 21.364.

Palabras Clave: Peligro volcánico; Planificación territorial; Estudios de riesgo; Normativa; Chile.

Agradecimientos: Agradecemos a todo el equipo de Xterrae por su apoyo en la realización de este artículo, y a Jorge Alborno por sus valiosos comentarios.

Referencias:

- RNVV-Sernageomin. (2020). Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile. Sernageomin. <https://rnvv.sernageomin.cl/que-es-ranking-de-riesgo/>
- Global Volcanism Program. (2013). Volcanoes of the World, v. 4.11.2. Venzke, E. (Ed.). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
- Márquez Poblete, M., & Veloso Pérez, E. (2021). El ordenamiento territorial en Chile: estado del arte. Estado, Gobierno y Gestión Pública, 35, 139-179. <https://revistaeggp.uchile.cl/index.php/REGP/article/view/61424>
- Espinace Vidal, J. (2020). Gobernanza de la planificación territorial y el riesgo en Chile: El caso de San Bernardo y Calera de Tango. Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 4(2), 7-21. <http://doi.org/10.55467/reder.v4i2.47>

Mapa interactivo de peligro de aluviones en las cuencas altas de los ríos Maipo y Mapocho: plataforma web

Mónica Viviana Marín David¹, Hugo Neira¹, Valeska Farías¹, Antonio Muñoz¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile

El Mapa Interactivo de Peligro de Aluviones de las cuencas Altas de los ríos Maipo y Mapocho es una plataforma web diseñada para brindar información estadística y de peligro en cada una de las quebradas y geoformas mapeadas en dicha área de estudio, incluyendo las subcuencas principales y está basada en los mapas publicados por el Sernageomin (Espinoza, et al, 2019 y Marín, et al 2022) a escala 1:100.000 que incluyen las comunas de San José de Maipo y Lo Barnechea respectivamente, de la región Metropolitana de Santiago. El objetivo principal de la plataforma es poder navegar sobre las áreas del mapa e interactuar por medio de un panel informativo para visualizar de mejor manera el peligro junto con las estadísticas morfométricas en cada una de las unidades hidrográficas, de esta manera acercar el conocimiento a las comunidades y a los tomadores de decisiones como ayuda para comprender y observar espacialmente los diferentes rangos de peligros asociados a remociones en masa de tipo flujo (aluviones) en las comunas para de esta manera tomar decisiones informadas para la gestión del riesgo.

La plataforma web presenta una interfaz intuitiva de visualización de peligros geológicos con acceso multiplataforma marca un avance significativo en la Gestión del Riesgo de Desastre (GRD) en la Planificación Territorial. Más allá de proporcionar información accesible sobre peligros geológicos, esta innovadora herramienta tiene un impacto positivo en varios aspectos clave. En primer lugar, al ser accesible desde diversos dispositivos como computadoras, tablets y dispositivos móviles, garantiza que las partes involucradas puedan acceder a información crucial en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y agilizando la respuesta ante emergencias. Además, el web experience involucra a la comunidad, permitiendo que los ciudadanos tomen decisiones informadas sobre su entorno (barrio o sector) y tener una noción del peligro cerca de su zona, lo que fomenta la conciencia pública sobre la preparación ante desastres.

Los usuarios pueden interactuar con el mapa seleccionando capas temáticas específicas, como, por ejemplo, para una unidad hidrográfica: "Quebrada", se ve reflejada automáticamente: 1. el nombre, 2. nivel de peligro, 3. eventos de remoción en masa de tipo flujo (aluviones), 4. pendiente, 5. área, 6. razón de melton, 7. orden de drenaje, 8. factor LZ (longitud de drenaje), 9. litología, 10. altitud promedio, entre otros. El valor mayor de estos parámetros en cada unidad geomorfológica seleccionada refleja el nivel de peligro de alcance por aluvión, consultado en un punto determinado, esta información permite explorar cada uno de los sectores de las cuencas y revisar las zonas de peligro junto con las posibles zonas de alcance por flujo principalmente para la comuna de Lo Barnechea.

Finalmente se desprende que el Mapa Interactivo de Peligro de Aluviones de las Cuencas Altas de los ríos Maipo y Mapocho es una herramienta valiosa para la gestión del riesgo de remociones en masa de tipo flujo y un insumo de carácter consultivo, que sirve de base para la toma de decisiones, al incrementar la información respecto a este peligro y facilitar información detallada, actualizada y accesible para ayudar a las comunidades a comprender, preparar y responder de manera efectiva a los peligros asociados con los aluviones en estas áreas.

En términos de planificación, la plataforma permite la visualización e identificación precisa de áreas de alto peligro y facilita la formulación de estrategias de mitigación más efectivas. Esto se traduce en una planificación territorial más resiliente y adaptada a las condiciones geológicas y geomorfológicas específicas. Además, el espacio de colaboración creado por el web experience promueve la cooperación entre distintos actores de la GRD, como investigadores, académicos y desarrolladores. Esto lleva a una mejora constante de la plataforma y a la expansión de sus capacidades, contribuyendo al fortalecimiento continuo de la gestión de riesgos geológicos en la planificación territorial.

Palabras Clave: Visor, Peligro, Remociones en masa, Aluviones.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN.

Referencias:

- Espinoza, L.; Marín, M.; Pantoja, G. 2019. Peligro de remociones en masa tipo flujo de la cuenca alta del río Maipo, Región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-72: 1 mapa en dos hojas escala 1:100.000. Santiago.
- Marín, M.; Farías, V.; Arcos, R.; Fuentes, P. 2022. Peligro de remociones en masa de tipo flujo en la cuenca alta del río Mapocho, región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-22-98 (inédito), 1 mapa en 2 hojas, escala 1:100.000. Santiago.

15 años de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) de SERNAGEOMIN: logros y desafíos

Álvaro Mauricio Amigo Ramos¹, Cintia Bengoa¹, Franco Vera¹, Carlos Cardona¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Avda. Santa María 0104, Santiago, Chile

La Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) de SERNAGEOMIN ha cumplido un destacado rol en términos de monitoreo y evaluación de peligros de la variable de riesgo volcánico en el país desde su implementación en el año 2009. Este hito, vino a reestructurar y potenciar significativamente el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), creado el año 1996, y a la vez absorber y rediseñar el Programa de Riesgo Volcánico (PRV), creado a principios de la década de 1990.

La misión de la RNVV es la generación de conocimiento técnico-científico sobre la actividad volcánica en el país con objeto de proveer información oportuna a las autoridades y población. Lo anterior es relevante para la correcta gestión de emergencias volcánicas, particularmente en la toma de decisiones enfocadas en la seguridad de comunidades expuestas y al resguardo de la infraestructura.

En sus casi 15 años de funcionamiento, la RNVV ha evolucionado desde un plan de implementación de una red de observatorios regionales a fortalecer un centro de vigilancia situado en Temuco, donde originalmente se emplaza OVDAS. Además, en la sede central de SERNAGEOMIN opera el grupo encargado de la caracterización geológica de los volcanes para evaluar su peligrosidad. Durante este período, se ha experimentado un crecimiento notable en la capacidad de análisis y de operación. La red instrumental actual se concentra entre las regiones de Arica y Parinacota y de Aysén, se cuenta con un protocolo de comunicación con el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y, entre otros aspectos, se han establecido un sistema de alertas técnicas volcánicas (verde, amarilla, naranja y roja) para dar aviso sobre el estado de actividad volcánica. Por otra parte, se ha diseñado un programa de publicaciones con miras a elaboración de información geológica y cartográfica de peligros volcánicos. Esto último, busca establecer zonificación de peligrosidad en el entorno de los volcanes activos, crucial para el manejo de crisis eruptivas y para planificaciones de largo plazo orientadas al ordenamiento territorial.

Esta contribución dará cuenta de la evolución de la RNVV en términos de 1) priorización de trabajos en los volcanes activos del país en función de su peligrosidad y exposición de población e infraestructura, 2) el sistema de monitoreo en tiempo real y evaluación de peligrosidad en los volcanes más activos del país, 3) recuento de las crisis eruptivas ocurridas y 4) actividades de divulgación realizadas.

Finalmente, se discutirá en torno a los principales desafíos futuros de la RNVV como la consolidación de un plan de estratégico de continuidad y optimización del monitoreo y cartografía volcánica, cobertura de zonas que no cuentan actualmente con monitoreo volcánico (Regiones de Magallanes y Atacama, además de los territorios Antártico e Insulares), fortalecimiento de la cooperación volcanológica internacional y desafíos según la nueva legislación vigente, en particular la Ley 21.364 la cual crea SENAPRED.

Palabras Clave: Vigilancia volcánica, Evaluación de Peligros, Volcanismo activo.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Caracterización morfológica de flujos de lava intermedios a silícicos

José Pablo Sepúlveda¹⁻², Raffaello Cioni¹, Álvaro Aravena²⁻³

(1) Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, Florencia, Italia

(2) Millennium Institute on Volcanic Risk Research – Ckelar Volcanoes, Antofagasta, Chile

(3) Universidad Católica del Maule, Departamento de Biología y Química, Facultad de Ciencias Básicas, Talca, Chile

La morfología de un flujo de lava es el resultado del efecto combinado de los parámetros eruptivos de la fuente (e.g. tasa de efusión, geometría de la fuente), las propiedades del magma y las características del terreno sobre el cual el flujo de lava se emplazó (Hulme, 1974; Griffiths et al., 2003). En consecuencia, el análisis morfológico de los flujos de lava puede proveer información clave para interpretar los parámetros fundamentales que controlan las erupciones que los generaron, con importantes aplicaciones para la definición de escenarios eruptivos. Sin embargo, aunque se ha abordado ampliamente la relación entre la morfología de lavas básicas y las condiciones eruptivas, la caracterización y clasificación de la morfología de lavas intermedias a silícicas aún no es exhaustiva. En esta contribución, se presenta una caracterización basada en datos morfológicos de un conjunto de 49 flujos de lava intermedios a silícicos de la Zona Volcánica Central de los Andes (Sepúlveda et al., 2023). El conjunto de datos analizados incluye modelos de elevación digital e imágenes satelitales, además de información bibliográfica sobre la geoquímica y petrología de los flujos de lava considerados. Se distinguen cuatro categorías: (a) *ridged lavas*, que presentan crestas arqueadas con superficies convexas, alto espesor y lóbulos frontales lisos; (b) *coulee lavas*, con características transicionales entre flujos de lava y domos, con formas relativamente simples y longitudes que no exceden significativamente los valores de espesor; (c) *leveed lavas*, que tienen formas relativamente simples, una marcada canalización y un frente único de máximo espesor; y (d) *breakout lavas*, que tienen formas complejas a simple vista, con lóbulos laterales y frontales, levées poco desarrollados y frentes anchos y espesos. Se reconoce además una familia de flujos de lava con características transicionales entre las categorías descritas previamente. Mostramos que la longitud de onda máxima de la deformación superficial se correlaciona espacialmente con la distribución del espesor del flujo. La longitud de onda máxima está mal correlacionada con el contenido de SiO₂ y débilmente correlacionada con la viscosidad, mostrando una correlación positiva con el componente gravitatorio del esfuerzo cortante aplicado al flujo. Los resultados sugieren que la pendiente y la viscosidad previas a la erupción, junto con la tasa de efusión, desempeñan un papel dominante sobre la dinámica general del flujo y, por lo tanto, sobre la morfología de la lava resultante, lo que afecta diferentes características medibles, como la longitud, el ancho, la ramificación y la dinámica de deformación del flujo. Esta estrategia puede ser adoptada para estudiar remotamente flujos de lava de difícil acceso en la Tierra y en otros planetas.

Palabras Claves: flujo de lava, morfología, reología.

Referencias:

- Griffiths, R. W., Kerr, R. C., & Cashman, K. V. (2003). Patterns of solidification in channel flows with surface cooling. *Journal of Fluid Mechanics*, 496, 33-62.
- Hulme, G. (1974). The interpretation of lava flow morphology. *Geophysical Journal International*, 39(2), 361-383.
- Sepúlveda, J. P., Cioni, R., & Aravena, A. (2023). Morphology-based characterization of intermediate to silicic lava flows: Application to the Central Andean Volcanic Zone. *Earth-Science Reviews*, 104433.

Probabilistic volcanic hazard assessment of the Chilean-Argentinian segment of the Central Volcanic Zone of the Andes (22.5-28°S)

Daniel Bertin¹⁻², Jan Lindsay², Shane Cronin², Shanaka de Silva³, Charles Connor⁴, Pablo Caffè⁵, Pablo Grosse⁶⁻⁷, Walter Báez⁸, Emilce Bustos⁸, Robert Constantinescu⁴

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Edición y Biblioteca, Santiago, Chile

(2) University of Auckland, School of Environment, Faculty of Science, Auckland, New Zealand

(3) Oregon State University, College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Corvallis, Oregon, United States

(4) University of South Florida, School of Geosciences, Tampa, Florida, United States

(5) CONICET - Universidad Nacional de Jujuy, Instituto de Ecorregiones Andinas & Instituto de Geología y Minería, San Salvador de Jujuy, Argentina

(6) CONICET, Buenos Aires, Argentina

(7) Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina

(8) IBIGEO, UNSa-CONICET, Instituto de Bio y Geociencias del NOA, Salta, Argentina

Evaluation of volcanic hazards typically focuses on single eruptive centres or spatially restricted areas, such as stratovolcanoes or single volcanic fields. Expanding hazard assessments across wide regions (e.g., large sections of an active continental margin) has rarely been attempted, due to the complexity of integrating long-term temporal and spatial variability in tectonic and magmatic processes. In this contribution, we investigate new approaches to quantify the hazards of such large and complex settings, using the example of the 22.5–28°S segment of the Central Volcanic Zone of the Andes, across the Chilean-Argentinian border. Our research is based on the estimation of: 1) spatial probability of future volcanic activity (based on geospatial techniques using a new volcanic geospatial database), 2) temporal probability of future volcanic events (based on time-variant volumetric eruption rates), and 3) areas susceptible to volcanic flow and fall processes (based on computer modelling using a recent, all-in-one tool). By integrating these results, we produce a set of regional, probabilistic volcanic hazard maps. We then use this suite of maps to calculate the relative probabilities of population centres in the area being affected by any volcanic phenomenon. Touristic towns such as La Poma (Argentina), Toconao (Chile), Antofagasta de la Sierra (Argentina), Socaire (Chile), and Talabre (Chile) are exposed to the highest relative volcanic hazard. In addition, through this work we delineate five regions of high spatial probability (named here as volcanic clusters), three of which correlate well with geophysical evidence of mid-crustal partial melt bodies. Many of the eruptive centres within these volcanic clusters have poorly known eruption histories and are recommended to be targeted for future work. We hope this contribution provides a solid, first-order framework on which to build a detailed understanding of arc-scale/regional volcanic hazard for other active arc segments.

Keywords: Central Volcanic Zone, Chile, Argentina, MatHaz, Volcanic hazards.

Financing: CONICYT-Becas Chile, Grant 72170365 University of Auckland, New Zealand.

Evaluación de vulnerabilidad y riesgo de los volcanes San Pedro y Ollagüe

Alfredo Esquivel Cáceres¹⁻², Felipe Aguilera¹, Poullette Ortiz¹⁻³, Mauricio Rivera¹⁻³, Tom Gonzalez¹⁻³, Idir Bascuñan¹⁻³,
María-Paz Reyes-Hardy¹⁻⁴

(1) Millennium Institute on Volcanic Risk Research - Ckelar Volcanoes, Antofagasta, Chile

(2) Programa de Doctorado en Ciencias Mención Geología, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(3) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile

(4) Department of Earth Sciences, University of Geneva, Geneva, Switzerland

En el último tiempo han incrementado los estudios de peligros y riesgos asociados a la Zona Volcánica Central de los Andes, pero en Chile todavía son escasas las investigaciones de riesgo volcánico. Como medida para contribuir a la prevención ante los impactos, manejo de emergencias y mitigación del riesgo asociado a volcanes del norte de Chile, se realizó este análisis en los volcanes Ollagüe y San Pedro. Como primera etapa se desarrolló la evaluación multi-peligro integrada de ambos volcanes (caída de ceniza, corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava, etc.), mediante trabajo en terreno y modelamiento numérico. En una segunda etapa se caracterizó *in situ* la exposición y vulnerabilidad de los elementos en riesgo social, físico, territorial y económico. La combinación de todos estos elementos a través de índices de vulnerabilidad y superposición de las diversas capas de los mapas obtuvo como resultado final un análisis cualitativo mediante cuatro mapas de riesgos para cada volcán: social, físico, territorial y económico.

En este trabajo se presentan los productos finales de los análisis de riesgos sociales, físicos, territoriales y económicos mediante mapas cualitativos de riesgo de los volcanes Ollagüe y San Pedro, dos de los volcanes más peligrosos del norte de Chile. Además de exponer y describir estos mapas, se resume a través de tablas los alcances obtenidos y elementos potencialmente afectados por una erupción volcánica, en el caso del volcán Ollagüe los poblados Amincha, Coska y Ollagüe con 225 estructuras y 232 personas evaluadas; y en el volcán San Pedro, el poblado y estación de Ascotán, la estación San Pedro, campamento Codelco, la central geotérmica Cerro Pabellón junto a su campamento habitacional, y redes de transmisión eléctrica, en toda esta área fueron analizadas 202 estructuras y 114 personas.

La importancia más amplia de este trabajo radica en el mapeo de elementos en riesgo ante eventuales erupciones volcánicas y sus respectivas dimensiones de vulnerabilidad, factores fundamentales para el desarrollo de más mapas de riesgos para los volcanes activos de la región y país. Este tipo de estudio es un primer paso fundamental para el entendimiento de como crecen y a que ritmo los elementos expuestos a la actividad volcánica (e.g infraestructura, población, etc.), pero al mismo tiempo se convierte en un desafío evaluar que tan frecuente es necesaria una investigación de esta índole, puesto que, a diferencia de los mapas de peligros, los de riesgos dependen en gran medida del contexto dinámico y en constante evolución del entorno del volcán. Como recomendaciones que podrían ser consideradas por las organizaciones gubernamentales a cargo de la gestión y manejo de emergencias, y por consiguiente las comunidades altiplánicas, se concluyen sugerencias de zonas y vías de evacuación ante una erupción volcánica, como un aporte generado a partir de la caracterización de los elementos analizados en este estudio.

Palabras Clave: vulnerabilidad, cualitativo, riesgo volcánico, volcán Ollagüe, volcán San Pedro.

Descripción y modelación de flujos volcánicos para la erupción del Calbuco 2015

Felipe Flores¹, Mark Woodhouse²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Teatinos 50, piso 7, Santiago, Chile

(2) University of Bristol, School of Earth Science, Wills Memorial Building, Queens Road, Clifton, Bristol, United Kingdom

Conocer los mecanismos de transporte y emplazamiento de los flujos piroclásticos junto con su posible evolución hacia lahares al interactuar con fuentes de agua, y a su vez, comprender la dinámica de los lahares desde su formación hasta su dilución, es fundamental para definir con rangos de certeza tolerables, escenarios de peligro, y evaluar de forma precisa las áreas susceptibles de estos procesos volcánicos.

La erupción del volcán Calbuco el año 2015, es el ejemplo más reciente en Chile, de la capacidad destructiva de lahares y flujos piroclásticos. Sus parámetros eruptivos han sido relativamente bien estudiados, lo que sumado a la amplia exposición de sus depósitos y el fácil acceso al área de estudio, lo convierten en un caso ideal para el estudio de los flujos volcánicos explosivos, y una excelente oportunidad para el uso de observaciones de campo en la calibración de modelos numéricos de simulación de procesos volcánicos, los cuales constituyen una herramienta cada vez más importante en la evaluación de peligros, siendo en la actualidad ampliamente usados (e.g., O'Brien, 2007; Christen, Kowalski & Bartelt, 2010).

Este trabajo utiliza la extensa información disponible de la erupción junto a inéditas observaciones geológicas levantadas en los valles del río Blanco y Este, en el flanco sur del Calbuco, para desarrollar un modelo conceptual de los flujos volcánicos junto a una primera fase de calibración del modelo LaharFlow, un modelo físico para la simulación de lahares implementado con la formulación de capa delgada ("shallow layer"), que simula una reología variable, y que incluye la parametrización del proceso de erosión-deposición (Woodhouse et al, 2016).

La aproximación identifica los parámetros activos que tienen un control dominante en el modelo para determinar los parámetros más útiles de calibrar, y adopta la medida de la plausibilidad (Vernon, Goldstein & Bower, 2010) que incorpora las incertezas observacionales o de campo y las del modelo.

Las conclusiones preliminares, sostienen que la erosión es un proceso clave en la dinámica y emplazamiento de los lahares y que los parámetros del modelo, que la representan tienen una alta correlación con los resultados. El modelo logra una buena representación de las áreas de inundación con coeficientes de Jaccard entre 0.6 y 0.8, en las áreas de inundación reales versus las modeladas.

Palabras Clave: Volcán Calbuco, Lahar, Flujo Piroclástico.

Referencias:

- Christen, M., Kowalski, J. & Bartelt, P. (2010) RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, Cold Regions Science and Technology, 63(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>.
- O'Brien, J. S. (2007). FLO-2D User's Manual, (<https://documentation.flo-2d.com/>).
- Woodhouse, M. J., Langham, J., Hogg, A. J., & Phillips, J. C. (In preparation) A shallow-layer model for lahars: formulation and phenomenology. (Non-peer reviewed draft available at www.laharflow.bris.ac.uk/paper/draft.pdf).

Nueva evaluación de Amenaza Volcánica para volcanes activos en Chile: Metodología y Ejemplos

Nicolás Hidalgo Bahamonde¹, José Luis Palma Lizana¹, Franco Vera Rivadeneira², Diego Castillo Acuña¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Campus Concepción Edmundo Larenas 129 Casilla 160-C, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Santiago, Chile

A lo largo de todo Chile existen volcanes con diferentes niveles de peligrosidad, algunos de ellos siendo los más activos del continente. Muchos de estos volcanes tienen población presente en sus alrededores, además de ser importantes sitios de interés turístico, lo que atrae cada vez a más personas. Esto hace necesario contar con métodos adecuados para evaluar la amenaza y el riesgo. Cabe destacar que en este trabajo los términos “amenaza” y “riesgo” se consideran como la traducción directa de las palabras “*threat*” y “*risk*”, respectivamente. En específico, se acoge la definición de “*volcanic threat*” del estudio NVEWS, donde el valor de amenaza se obtiene a partir de la combinación de factores de peligro y factores de exposición (*exposure*), mientras que el riesgo debe incluir también la vulnerabilidad. Se ha desarrollado una Metodología de Evaluación de Amenaza Volcánica que integra mapas detallados de peligro y exposición, incluyendo personas, viviendas, rutas e infraestructuras críticas. Este trabajo se aproxima a una evaluación de riesgo ya que se considera la exposición de las personas y demás elementos susceptibles a ser afectados por los peligros volcánicos, pero se deja de lado la vulnerabilidad de los mismos. Esta acepción de “amenaza” se considera análoga al término “riesgo específico” utilizado por SERNAGEOMIN en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile (RREVA).

Esta metodología se sustenta en una base de datos geo-espacial de alta relevancia que permite analizar la amenaza y el riesgo volcánico de manera precisa. Los elementos de la base de datos son cuantificados y ponderados utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), reflejando así la importancia relativa de cada componente. Dichos componentes fueron preprocesados y ordenados en capas de información geoespacial, las cuales fueron superpuestas con mapas de peligro volcánico.

Se llevaron a cabo evaluaciones en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, utilizando mapas de peligro integrado semicuantitativos elaborados previamente en la Universidad de Concepción, dichos mapas fueron contruidos bajo los mismos criterios e integran zonas de afectación de CDPs, lavas, lahares, PBVs y caída de ceniza. Además, las evaluaciones fueron llevadas a cabo usando mapas de peligro elaborados por SERNAGEOMIN, los cuales fueron adaptados para este fin. Los resultados obtenidos dependen del tipo de mapa utilizado y solo son comparables dentro del mismo tipo, donde es posible comparar las diferencias entre la relación peligro-exposición según el tipo de mapa utilizado.

La metodología propuesta ofrece resultados de alto detalle y claridad respecto a la relación entre los peligros volcánicos y la exposición asociada en cada macizo. Se observa una buena correlación entre los valores de amenaza absoluta de personas y de infraestructuras, lo que permite utilizar el número de personas amenazadas como proxy de la amenaza total para la confección del ranking.

Una de las ventajas que ofrece este método es que se puede analizar la amenaza volcánica en sectores específicos, lo cual permite, por ejemplo, conocer cómo es la amenaza volcánica en los poblados aledaños a los volcanes estudiados. Se elaboraron rankings de amenaza absoluta y normalizada tanto para volcanes como para los poblados expuestos. Los poblados de Pucón, Neltume, Cofiaripe y Melipeuco presentan la mayor amenaza en los volcanes estudiados.

Esta metodología se presenta como una base para incluir la mayor cantidad posible de volcanes y realizar estudios de vulnerabilidad en el futuro, lo que permitirá una evaluación completa del riesgo volcánico en Chile. La flexibilidad y funcionalidad de esta metodología la convierten en una herramienta sólida para la evaluación de amenaza volcánica en distintos niveles, proporcionando información detallada y objetiva para la gestión del riesgo volcánico a nivel regional o local.

Palabras Clave: Amenaza volcánica, Riesgo, Exposición, Peligro volcánico.

Evaluación detallada del riesgo específico de volcanes activos en Chile y sus poblados

José Luis Palma Lizana¹, Franco Vera Rivadeneira², Nicolás Hidalgo¹, Paula Peñaloza¹, Diego Castillo Acuña¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario S/N, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Santiago, Chile

La Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV), que es parte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) mantiene el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile (RREVA). Este ranking se construye a partir de 13 factores de peligro y 12 factores de exposición. Entre los factores de peligro se incluyen descriptores de la actividad explosiva del volcán, la ocurrencia de algunos fenómenos de peligro, y el potencial de generar otros peligros. Entre los factores de exposición se consideran descriptores de la población que vive en zonas de peligro, tráfico aéreo, víctimas fatales, turismo y de infraestructura. La metodología para crear este ranking de riesgo específico se basa en el trabajo "An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System (NVEWS)" del Servicio Geológico de los EE.UU. Este ranking tiene gran importancia para la toma de decisiones técnicas y relacionadas a la disminución del riesgo de desastres; por ejemplo, permite definir la distribución de recursos de monitoreo para los distintos volcanes, en función de su posición en el ranking, definir la instrumentación adecuada para cada volcán activo, o las prioridades para realizar nuevos estudios geológicos o de peligros volcánicos.

En esta presentación se expondrán los resultados de un análisis detallado del riesgo específico para los 26 volcanes más activos de Chile, o de mayor riesgo específico según el RREVA, y también para los poblados que rodean estos volcanes. La metodología incorpora una cuantificación del peligro volcánico en base a los mapas de peligro elaborados por SERNAGEOMIN, y en la evaluación detallada de la distribución de la población e infraestructura crítica. Toda esta información se incorporó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su fácil evaluación y mantención.

Notar que en este trabajo las palabras "peligro", "amenaza", "exposición" y "riesgo" tienen el significado de las palabras en inglés "hazard", "threat", "exposure" y "risk", respectivamente. El término "riesgo específico" es utilizado por la RNVV-SERNAGEOMIN para la evaluación del RREVA, derivado del estudio NVEWS y que en inglés se denomina "assessment of volcanic threat". Así, los términos "riesgo específico" y "amenaza" son considerados análogos.

Los resultados se pueden dividir en 4 grupos:

1. Ranking detallado del riesgo específico de volcanes activos
2. Ranking de amenaza normalizada de volcanes activos
3. Ranking de riesgo específico volcánico de poblados
4. Ranking de amenaza volcánica normalizada de poblados

El primero (1) es una evaluación comparable al RREVA pero con mayor detalle en la consideración de las áreas de peligro como factores cuantitativos, y en la cuantificación de la población e infraestructura crítica que podría ser afectada por los fenómenos volcánicos. La principal diferencia es que en (1) no se consideran los factores de peligro del RREVA que describen el tipo de volcán o la actividad explosiva pasada, mientras que los factores de peligro relacionados a los fenómenos volcánicos se encuentran intrínsecamente representados en las zonas de peligro de cada volcán. La amenaza normalizada corresponde al nivel de peligro medio del poblado o volcán, ponderado según la distribución de población entre las diferentes zonas de peligro volcánico. De esta forma, el ranking (2) entrega información complementaria al ranking de riesgo específico de volcanes (1). Los resultados de riesgo específico y amenaza volcánica normalizada para poblados (3) y (4) son únicos y originales en Chile. En total, se analizó la amenaza de 36 poblados expuestos a fenómenos volcánicos asociados a los volcanes de estudio. Al igual que con el RREVA, el análisis de amenaza de los pueblos expuestos permitirá a las autoridades tomar decisiones importantes en cuanto al destino de recursos y prioridad en el foco de atención de estudios de gestión de riesgos.

Finalmente, se discutirán algunas aplicaciones de estos resultados, su impacto en la gestión de riesgos, y trabajo a futuro que pueda mejorar estas herramientas.

Palabras Clave: riesgo específico, amenaza volcánica, peligros volcánicos.

Reproducibilidad en volcanología aplicada a la evaluación de peligros y riesgos volcánicos

José Luis Palma Lizana¹, Franco Vera Rivadeneira²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario S/N, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Santiago, Chile

Reproducibilidad y replicabilidad son dos conceptos que cada vez tienen mayor aceptación en el desarrollo científico, particularmente en el área de las ciencias de la computación. La reproducibilidad se refiere a la capacidad de obtener los mismos resultados de un estudio determinado, utilizando los mismos métodos, datos y materiales utilizados originalmente. La replicabilidad se refiere a la capacidad de obtener los mismos resultados de un estudio determinado utilizando los mismos métodos, pero con nuevos datos. En ambos casos se persigue la verificación y validación de los resultados, los cuales llevan a una mejor utilización e interpretaciones correctas de estos resultados. La reproducibilidad y replicabilidad de investigaciones vulcanológicas pueden convertirse en principios claves para avanzar en el conocimiento científico y para adquirir confianza en la aplicación de sus resultados. Sin embargo, hasta ahora la aplicación de estos conceptos en volcanología no ha sido evaluada ni discutida.

En esta presentación se mostrará la importancia que estos conceptos han generado en otras ciencias y se delinearán principios para utilizarlos en la evaluación de peligros y riesgos volcánicos. Es importante notar que, aunque no es razonable esperar que los diferentes componentes de una investigación aplicada en volcanología puedan ser reproducidos, sí es razonable esperar que las metodologías y principales resultados obtenidos sean comprendidos y puedan ser replicados o validados de alguna manera. La aplicación de estos conceptos en la evaluación de peligros volcánicos genera un cambio conceptual del por qué se realizan estos análisis, el cómo se estructuran, y la utilización de los resultados que entregan.

Se presentará un ejemplo en el cual se describen 10 aspectos que definen el análisis de peligro volcánico. Cada uno de estos aspectos puede condicionar los resultados y alcances del análisis. Siguiendo este procedimiento se desarrollaron evaluaciones semi-cuantitativas de peligro volcánico en 6 volcanes activos de los Andes del sur de Chile: Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuencho. Los resultados de estos análisis de peligros (incluyendo mapas de peligro) permiten la comparación de los diferentes niveles de peligro en cada volcán, y pueden ser comprendidos y reproducidos por otros expertos que no estuvieron involucrados en la evaluación inicial. Esto facilita la comunicación de los peligros volcánicos y permite identificar objetivamente las mejoras o actualizaciones que los análisis de peligro requieren.

Esta presentación propone que los estudios de peligros-riesgos volcánicos se realicen siguiendo los conceptos de reproducibilidad o replicabilidad, facilitando así el desarrollo de buenas prácticas en volcanología aplicada.

Palabras Clave: reproducibilidad, replicabilidad, peligros volcánicos, análisis de peligros, gestión del riesgo.

Análisis sobre la influencia de condiciones atmosféricas y actividad volcánica en la elevación de columnas de desgasificación observadas en el volcán Villarrica desde la erupción del año 2015

Gabriela Pedreros Delgado¹, Martin Jacques Coper²⁻⁴⁻⁵ María Angélica Contreras Vargas¹, Oscar Valderrama¹, Gabriela Velásquez¹, Jonathan Lazo³

(1) SERNAGEOMIN, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Observatorio Volcanológico de Los Andes del Sur, Rudecindo Ortega #03850, Temuco, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Concepción, Chile

(3) Universidad de La Frontera, Departamento de Ciencias Físicas, Temuco, Chile

(4) Center for Climate and Resilience Research (CR)2, Chile

(5) Universidad de Concepción, Center for Oceanographic Research COPAS-COASTAL, Concepción, Chile

El volcán Villarrica (39.42°S, 71.93°W, 2847 m.s.n.m) es el centro eruptivo de mayor riesgo específico según el Ranking de volcanes activos de Chile (Sernageomin, 2020), debido, principalmente, a la alta frecuencia eruptiva y exposición de los habitantes en su entorno, por lo cual es monitoreado multiparamétricamente en tiempo real.

Desde su última erupción en el año 2015, se han registrado al menos 5 periodos de inestabilidad por aumento de actividad volcánica según las señales sísmicas registradas (RSAM), flujos de SO₂ y/o anomalías de radiancia térmica, ameritando cambios de alerta técnica a amarilla y naranja, asociados a actividad vulcaniana, estromboliana y columnas de desgasificación superiores a 1 km de altura sobre el nivel del cráter. Este tipo de manifestación superficial se ha registrado durante eventos de mayor actividad volcánica así como también en periodos donde las señales instrumentales indican un bajo nivel de actividad interna, generando contradicción entre la información técnica entregada y la percepción del riesgo de la población.

La ausencia de señales instrumentales volcánicas durante la ocurrencia de ciertas actividades superficiales se ha interpretado como una baja dominancia de procesos internos, sin embargo, se desconoce el nivel de influencia de factores atmosféricos versus procesos volcánicos que sean indetectables por las actuales redes de monitoreo. En este estudio, se analiza la posible relación entre altura de pluma volcánica del volcán Villarrica (2.860 m), estimada a partir de fotografías de los eventos superficiales registrados para el periodo 2015-2023, y condiciones meteorológicas caracterizadas por datos de reanálisis NCEP-NCAR. Se seleccionaron 363 registros de verano (diciembre-febrero) con una altura de pluma entre 300 y 900 m, en ausencia de piroclastos evidentes para descartar actividad volcánica interna. A partir de éstos, se forman dos subconjuntos. El grupo 1 considera 12 fechas en que se registraron los 10 valores más altos de pluma volcánica (entre 660 y 900 m); el grupo 2 comprende 11 fechas en que la pluma volcánica no superó 300 m. Para ambos casos, se consideran las anomalías de campos promedios de variables meteorológicas respecto a la climatología de 1991-2020. Para ambos grupos, las configuraciones sinópticas representan condiciones de estabilidad atmosférica, determinada por una alta presión migratoria en superficie. Para el grupo 1, el núcleo del anticiclón (anomalía de ~6hPa) se centra sobre la región de Magallanes, al extremo sur de Sudamérica, mientras que para grupo 2, la máxima anomalía (de ~4hPa) se centra al oeste de la región de Aysén. Consecuentemente, sobre la Araucanía y en 700 hPa (aproximadamente la altura del cráter), el grupo 1 muestra condiciones más cálidas que el 2 (anomalías de +4°C vs +2°C) y más húmedas (anomalías de -10% vs -15% en humedad relativa; 0 g/kg vs -0,4 g/kg en humedad específica). Nuestros resultados preliminares indican que las condiciones relativamente más cálidas y húmedas del grupo 1 favorecerían el desarrollo vertical de la columna. La representación del nivel de actividad volcánica se representa según el RSAM, flujo de SO₂ y dinámica del lago de lava según las anomalías de radiancia térmica y fotointerpretación de imágenes satelitales, con el fin de caracterizar los condicionantes volcánicos para la generación de columnas de desgasificación que propicien un estado de alerta e inseguridad en la población que las percibe. A su vez, se identifica la influencia de los vientos en los eventos de mayor altura y la señal sísmica detectada en aquellos eventos superficiales diurnos con emisión de piroclastos como indicadores de procesos superficiales volcánicos, permitiendo contrastar entre los distintos tipos de actividad superficial observadas.

La reconstrucción de las condiciones atmosféricas, volcánicas y su interacción en el volcán Villarrica permite entregar una respuesta integral y concreta a la comunidad durante episodios de *unrest* así como también en periodos de estabilidad. La comprensión de estas variables es clave para desarrollar modelos que permitan advertir y distinguir la generación de eventos de bajo peligro y alto impacto visual de aquellos de similares características pero que requieran mayor atención y acompañamiento de los sistemas de gestión del riesgo.

Palabras Clave: volcán Villarrica, monitoreo volcánico, percepción del riesgo, factores atmosféricos.

Evaluación de amenaza asociada a los sistemas volcánicos chilenos Tarapacá, San Pedro, Tupungatito, Planchón-Peteroa, Cerro Azul-Quizapu, Quetrupillán, Osorno, Calbuco, Chaitén y Hudson

Paula Peñaloza¹, José Luis Palma¹, Nicolás Hidalgo¹, Diego Castillo¹, Franco Vera²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Química, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

Los volcanes tienen una importante presencia en la geografía del territorio nacional. En Chile continental e insular se localizan cerca de 2.000 volcanes, 92 de ellos potencialmente activos y 45 monitoreados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Producto de la creciente expansión demográfica del país, extensas comunidades se han emplazado dentro del área de influencia de potenciales peligros volcánicos. Dado sus amplias implicaciones socioeconómicas, esta problemática establece la necesidad de desarrollar metodologías de cuantificación de la amenaza volcánica mediante herramientas de fácil comprensión, rápida elaboración y replicables, para asistir a la toma de decisiones y enfocar las estrategias para la reducción del riesgo de desastres a nivel nacional, que integre tanto la evaluación de amenaza como de vulnerabilidad.

El presente trabajo propone una nueva evaluación de amenaza volcánica de diez de los treinta centros eruptivos de mayor riesgo específico del país, según el ranking elaborado por SERNAGEOMIN (2020), y de los poblados afectados por los peligros derivados de estos. Los sistemas volcánicos en estudio corresponden a Tarapacá, San Pedro, Tupungatito, Planchón-Peteroa, Cerro Azul-Quizapu, Quetrupillán, Osorno, Chaitén, Calbuco y Hudson. Con el fin de parametrizar, nivelar y categorizar los valores de amenaza, se implementa una nueva metodología (Hidalgo, 2023) que utiliza los mapas de peligro volcánico preparados por el SERNAGEOMIN para generar un análisis de personas e infraestructuras expuestas a peligros volcánicos mediante el procesamiento de datos del Censo 2017, empleando herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG).

La cuantificación de este conjunto de elementos y la incorporación de un factor de peligro permite la categorización de volcanes y poblados dentro de rankings de amenaza absoluta y normalizada, además de la elaboración de mapas de amenaza volcánica tanto para las áreas de alcance de un determinado volcán, como para los poblados expuestos de manera individual.

Los resultados muestran que los poblados expuestos que representan una mayor amenaza absoluta son Chaitén, Las Cascadas, Putre y Curarrehue, siendo la localidad de Chaitén la que presenta mayor porcentaje de su superficie total amenazada por una zona de muy alto peligro. En tanto, los volcanes Chaitén, Quetrupillán, Calbuco y Osorno corresponden a los centros eruptivos que imponen la mayor amenaza de este estudio. Mientras que el Complejo Cerro Azul-Quizapu, a pesar de presentar una de las erupciones holocenas más grandes de Sudamérica, evidencia una amenaza muy reducida, debido a que sus peligros volcánicos no exponen a ninguna persona ni infraestructura estable.

Esta investigación forma parte de una contribución mayor que busca implementar una nueva metodología de evaluación de amenaza que puede ser replicada en diferentes países y a distintas escalas. Además, este trabajo consiste en la primera evaluación de amenaza en poblados expuestos a peligros volcánicos a nivel nacional, convirtiéndose en una herramienta que permitiría a las autoridades contar con información oportuna para poner en práctica medidas de reducción del riesgo volcánico, con el fin de tomar decisiones enfocadas en la seguridad de la población.

Palabras Clave: peligro volcánico, exposición, amenaza, riesgo.

Referencias:

- Hidalgo, N. 2023. Metodología de evaluación de amenaza en centros volcánicos y poblados aledaños aplicada en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento Ciencias de la Tierra. Concepción.
- Instituto Nacional de Estadística. 2017. Censo de población y viviendas de Chile. <http://www.censo2017.cl/servicio-de-mapas/>
- Red Nacional de Vigilancia Volcánica. Servicio Nacional de Geología y Minería. 2020. Ranking de riesgo específico de volcanes activos de Chile. <https://rnvv.sernageomin.cl/que-es-ranking-de-riesgo/>

Estimación de riesgo volcánico: uso de la metodología ADVISE en el contexto chileno para la gestión y reducción del riesgo por modelamientos de peligro por caída de piroclastos en el volcán Hudson

Raúl Matías Pinto¹, Virginia Andrea Toloza², Felipe Andrés Quiero³

(1) Universidad Nacional Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, Autopista Concepción-Talcahuano 7100, Concepción, Chile

(2) Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Servicio Nacional de Geología y Minería, Rudecindo Ortega 03850, Temuco, Chile

(3) Universidad Nacional Andrés Bello, Departamento de Ciencias Físicas, Ciencias exactas, Autopista Concepción-Talcahuano 7100, Concepción, Chile

El estudio de riesgo volcánico presenta la dificultad de trabajar todos sus factores en conjunto como peligro, exposición y vulnerabilidad de una manera integral, esto se debe principalmente a la dependencia de las fases eruptivas de los distintos sistemas volcánicos y los elementos expuestos adyacentes a estos sistemas. Debido a esto, nace la metodología ADVISE elaborada por Bonadonna et al. (2021) como un método de evaluación integral de riesgo volcánico (ADVISE; siglas en inglés integrAted Volcanic risk asSEsment), el que analiza de una manera cualitativa, semicuantitativa y cuantitativa los principales focos de riesgo (dependiendo de la información geoespacial disponible) y que además agrega el factor resiliencia como factor de reducción de riesgo, identificando la principal infraestructura crítica clave para la evacuación y sistemas de alerta.

Dentro del contexto chileno, la Zona Volcánica Sur (SVZ) es una zona volcánica que presenta la mayor actividad volcánica en el mundo, siendo el volcán Hudson el que cuenta con uno de los mejores registros eruptivos con al menos 12 erupciones holocenas bien documentadas a través de los productos volcánicos estudiados principalmente en la tefroestratigrafía (Naranjo y Stern, 1998., Bertín, 2014) siendo información fundamental para la evaluación de peligros, por otra parte, las instituciones públicas en Chile, cuentan con una base de datos geoespacial robusta que ha ido creciendo a través de los CENSOS, estudios de las distintas subsecretarías ministeriales e instituciones públicas encargadas del desarrollo de la infraestructura social, construida, de medio ambiente, económica y sistemas críticos para potenciales evacuaciones siendo clave para la evaluación de factores de riesgo como exposición, vulnerabilidad y resiliencia.

En este trabajo se adapta la metodología ADVISE en el contexto chileno para la evaluación de riesgo volcánico en las localidades de Coyhaique, Puerto Aysén, Puerto Chacabuco, Río Ibáñez, Chile Chico, Balmaceda y Villa Cerro Castillo, donde en primera instancia se realiza un análisis a través de la distribución de poisson elaborado por De la Cruz-Reyna (1991) separando las probabilidades en tiempos prehistóricos e históricos por el intervalo de reposo entre las erupciones ocurridas, luego, se elaboraron mapas de probabilidad a través de modelos probabilísticos de peligro volcánico por caída de piroclastos a través del complemento de Matlab TephraProb (Biaass et al. 2016b) con un 30% de probabilidad de ocurrencia a través de escenarios subplinianos y plinianos donde se hizo una revisión del historial eruptivo teniendo en cuenta las erupciones mayores y sus parámetros eruptivos (ESP) como Distribución Total de Tamaños de Grano (TGSD), densidades de líticos y pómez, altura de la columna eruptiva y duración de los eventos a través de las erupciones H1, H2 (Naranjo y Stern, 1998) ocurridas en tiempos prehistóricos y las fases 1 y 2 de las erupciones de 1971 y 1991 en tiempos históricos, para luego, integrarlos con los elementos expuestos de una manera cuantitativa específicamente de elementos económicos, sistemas construidos, sociales, medio ambientales y elementos críticos para la evacuación, las vulnerabilidades física, sistémica y funcional se analizan de una manera cualitativa y cuantitativa con el fin de estimar zonas de mayor vulnerabilidad y por último, la resiliencia como factor de disminución de riesgo enfocado a través de las instituciones públicas, estructurales de la infraestructura construida y educacional-social para a gestión y reducción de riesgos por caída de piroclastos, generando un análisis de riesgo volcánico no aplicando a posterior, aplicando el factor resiliencia para estimar como este puede influir en la reducción de riesgo para las localidades de estudio.

Los resultados, en primera instancia, muestran que el sistema volcánico tiene una alta probabilidad de hacer erupción tomando las erupciones prehistóricas e históricas (siendo estas últimas las que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia al tener intervalos entre la primera y última erupción e intervalos de reposo menores), donde en los dos casos siguen una distribución exponencial y por lo tanto, siguen una distribución de poisson, bajo esta premisa y teniendo en cuenta que el volcán Hudson puede tener una erupción en cualquier momento, se elaboraron modelamientos de peligro, donde en primera instancia, se calibro la erupción de 1991 fase 1 donde el evento eruptivo tuvo un sentido de dispersión N10°E según Naranjo et al. (1993), donde los modelamientos determinísticos (variables fijas) tienen una buena aproximación con la erupción ocurrida en la fase I, teniendo en cuenta la calibración y su aproximación a la erupción ya ocurrida, se modelaron a través de términos probabilísticos los escenarios eruptivos, subplinianos y plinianos, donde el factor de peligro volcánico, se puede realizar una zonificación en base a las líneas de acumulación entre 300 a 0,01 cm, siendo las localidades categorizadas en un muy bajo peligro a moderado peligro en un evento subpliniano y categorizadas en un bajo peligro a alto peligro en un escenario pliniano, donde los mapas de acumulación muestran que los niveles de peligro aumentan para las localidades que están en el eje de dispersión (hacia el Este) y donde en cualquiera de los dos escenarios Villa Cerro Castillo es la que presenta una mayor zonificación. En términos de exposición, se tomaron en cuenta las primeras apariciones en un rango de kilómetros y primeras apariciones de los elementos de los focos de riesgo, siendo Coyhaique y Puerto Aysén, las que presentan una mayor exposición por tener mayor cantidad de infraestructura, aun cuando Villa Cerro Castillo es la más próxima al centro eruptivo. En términos de vulnerabilidad hay una clara dependencia del desarrollo social y de infraestructura, siendo localidades de menor densidad poblacional y por consiguiente un menor desarrollo social/infraestructura siendo estas las que presentan una menor capacidad de respuesta ante peligros asociado a caída de piroclastos, además, la infraestructura crítica para la evacuación presenta un aumento de vulnerabilidad tanto sistémica como funcional de un escenario subpliniano a pliniano, donde la red aeronáutica presenta una alta vulnerabilidad en cualquiera de los dos escenarios. La resiliencia como capacidad de respuesta y mitigación para la gestión y reducción de riesgos ante desastres presenta una clara implicancia, siendo la resiliencia institucional la más preponderante, donde las instituciones públicas como el Servicio Nacional de Geología y Minería, Servicio Nacional de Prevención y Respuestas ante Desastres (SENAPRED, ex Oficina Nacional de Emergencia) y planes de protección civil elaborados por las municipalidades, por otra parte, la resiliencia estructural, en Chile está moderadamente desarrollada donde localidades solo se puede evaluar en localidades considera-

das como ciudades y no así en las aldeas, esto por no presentar el catastro por el Instituto Nacional de Estadística (INE), la resiliencia educacional, Chile presenta un déficit debido a que en términos de educación de riesgo, hay un bajo conocimiento de los peligros geológicos a los que están expuestos determinadas localidades, en el caso del riesgo volcánico, hay un mayor conocimiento en volcanes que están activos y esto depende principalmente de las instituciones públicas.

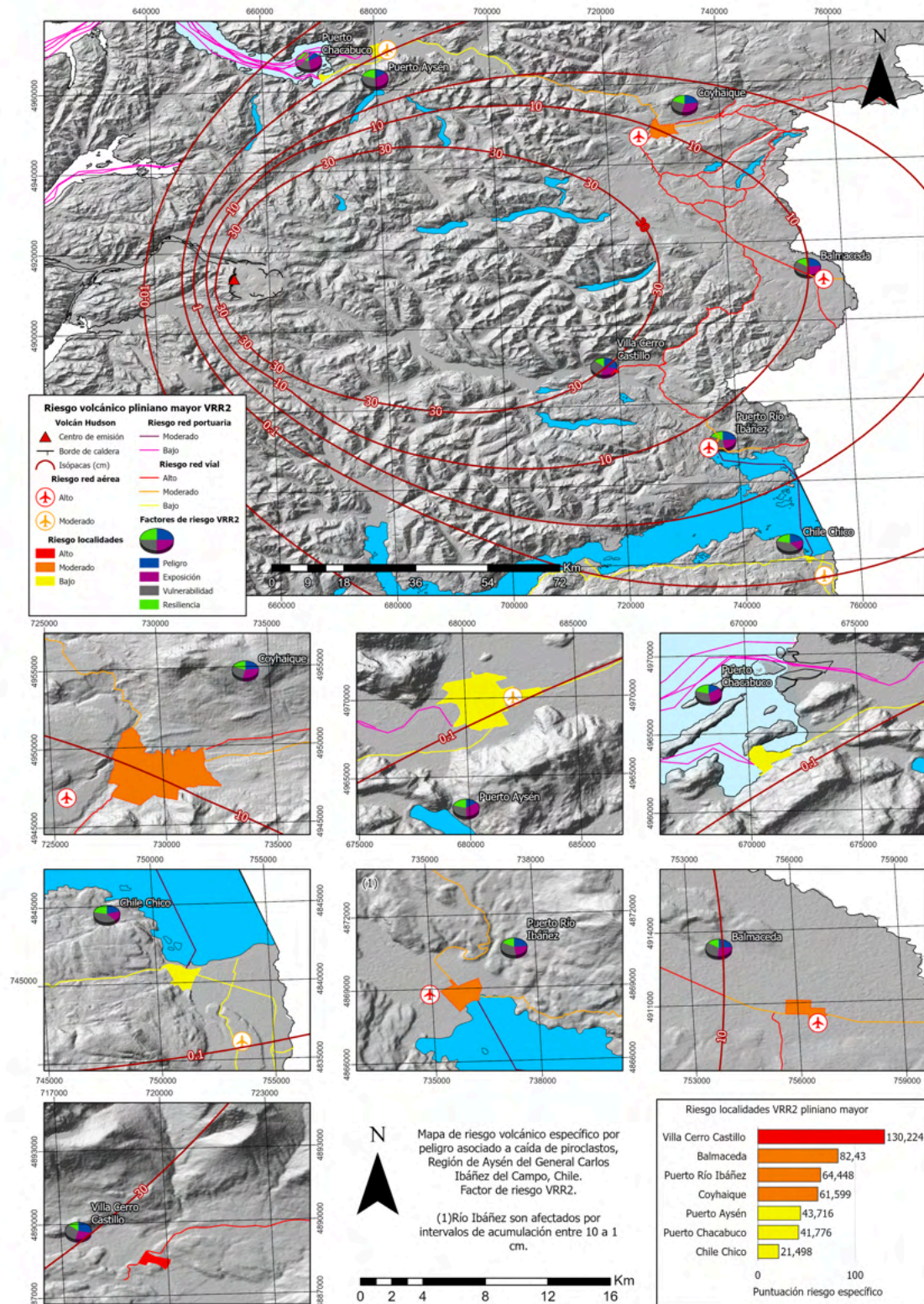


Figura 1. Mapa de riesgo regional/local para las localidades de estudio mediante la metodología ADVISE con un VRR(2) en un escenario pliniano, (1) Coyhaique, (2) Puerto Aysén, (3) Puerto Chacabuco, (4) Chile Chico, (5) Puerto Río Ibáñez, (6) Balmaceda y (7) Villa Cerro Castillo. Mapa regional muestra riesgo específico para la infraestructura crítica clave para la evacuación como red vial, red portuaria y red aérea.

Para la evaluación de riesgo y elaboración del Ranking de Riesgo Volcánico (VRR) se tomaron en cuenta dos fórmulas, la primera Ranking de Riesgo Volcánico (1) o VRR(1), definida como el producto de peligro, exposición y vulnerabilidad, la segunda Ranking de Riesgo Volcánico (2) o VRR(2), la que toma los productos de la primera fórmula y el factor resiliencia como reducción de riesgo adaptado de Bonadonna et al. (2021), se puede identificar un aumento de riesgo de un escenario de peligro subpliniano a pliniano, siendo las principales localidades afectadas las que están en el eje de dispersión y acumulación de piroclastos, para un escenario subpliniano VRR(1) se puede estimar un alto riesgo para localidades como Villa Cerro Castillo, moderado para Coyhaique, Río Ibáñez y Balmaceda, y bajo riesgo para Puerto Aysén, Puerto Chacabuco y Chile Chico, aplicando el factor de resiliencia para un VRR(2) solo hay un cambio de posiciones en la categorización de moderado donde Balmaceda cambiaría a segundo lugar y Coyhaique a cuarto lugar. En el caso de un escenario pliniano, hay un aumento de categorizaciones de riesgo donde en un VRR(1) Puerto Aysén y Puerto Chacabuco aumentan su categorización de riesgo a moderado y con un factor resiliencia para la reducción de riesgo en un VRR(2) (Figura 1) hay una disminución a bajo, siendo la resiliencia institucional la más preponderante, para la infraestructura crítica clave para la evacuación hay un aumento de riesgo de bajo a alto en la interconexión Coyhaique, Balmaceda, Villa Cerro Castillo y Puerto Río Ibáñez de un escenario subpliniano a pliniano y en el caso de la red aérea presentaría siempre riesgo alto.

Con los análisis de la estimación de riesgo volcánico, se puede determinar que la metodología ADVISE para la evaluación de riesgo volcánico integral, se puede estimar el riesgo tanto a escala local, regional y nacional siendo muy dependiente de la información geoespacial disponible a través de las instituciones públicas, además, el factor resiliencia puede ser preponderante para la mitigación y reducción de riesgo ante desastres, donde en Chile los servicios institucionales como la Red Nacional de Vigilancia Volcánica del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y Servicio Nacional de Prevención y Respuestas ante Desastres, han desarrollado sistemas robustos para la mitigación de determinados peligros geológicos que conllevan a determinados riesgos geológicos, en este caso peligros y riesgos volcánicos, por último, cabe destacar que el factor resiliencia podría ser más preponderante si se trabajara más la educación de riesgo en nuestro país.

Palabras Clave: Peligro volcánico, ADVISE, exposición, vulnerabilidad, resiliencia.

Referencias:

- Bertin, L. (2014). Granulometría, morfología, geoquímica y geocronología de los productos holocenos del volcán Hudson, Región de Aysén, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Bias, S., Bonadonna, C., Connor, L. and Connor, C. (2016). TephraProb: a Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout. *Journal of Applied Volcanology*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0050-5>.
- Bonadonna, C., Frischknecht, C., Menoni, S., Romero, F., Gregg, C. E., Rosi, M. and Cristiani, C. (2021). Integrating hazard, exposure, vulnerability and resilience for risk and emergency management in a volcanic context: the ADVISE model. *Journal of applied volcanology*, 10(1), 1-34. <https://doi.org/10.1186/s13617-021-00108-5>.
- De la Cruz-Reyna, S. (1991). Poisson-distributed patterns of explosive activity. *Bulletin of Volcanology*. Vol. 54. p. 57-67. <https://doi.org/10.1007/BF00278206>.
- Naranjo, J., Moreno, R. y Banks, N. (1993). La erupción del volcán Hudson en 1991 (46° S), Región XI, Aysén, Chile. *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería*, Chile. 44: 1-50.
- Naranjo, J. A. and Stern, C. (1998). Holocene explosive activity of Hudson volcano, southern Andes. *Bulletin of Volcanology*. 59: 291-306.

Percepción del riesgo de mujeres habitantes de zonas de volcanismo activo: reflexiones desde una mirada transgeneracional

Sofía Vargas Payera¹⁻³, Carolina Geoffroy², María Angélica Contreras⁴, Gabriela Pedreros⁴, Teresa Venegas⁵

(1) Departamento de Geología y CEGA, Universidad de Chile, Chile

(2) XTerra, Santiago, Chile

(3) ETH, TD Lab, Suiza

(4) SERNAGEOMIN, OVDAS, CHILE

(5) Liceo Bicentenario Polivalente Lonquimay

Las erupciones volcánicas son expresiones naturales de una tierra viva. Chile por sus condiciones geológicas- las que dan vida a un cordón montañoso presente en casi todo el país, además de 90 volcanes activos- integra una milenaria historia de innumerables erupciones volcánicas. Cómo estas erupciones afectan a quienes viven cerca de los volcanes depende de condiciones que no son naturales, sino sociales, políticas y económicas. Dentro de las características individuales que determinan el nivel de afectación de una erupción, las Naciones Unidas destaca el género, edad, pertenencia a un pueblo originario, discapacidades y acceso a la educación, entre otros. En particular, mujeres, jóvenes y niñas tienen más probabilidades de morir en desastres y ser afectadas por estos que los hombres. Esto no se relaciona a aspectos biológicos, sino que a roles de género y diferencias socioeconómicas.

En este sentido, conocer la percepción de mujeres, jóvenes y niñas que viven cerca de centros eruptivos, comprender cómo varía su entendimiento, comprensión y percepción del riesgo es crítico para promover una sociedad más resiliente, disminuir brechas de género y diseñar planes de emergencia pertinentes con la realidad cultural del territorio. Considerando esta necesidad, esta ponencia presenta los resultados de un estudio sobre percepción del riesgo de mujeres y jóvenes de la región de la Araucanía, Chile. Desde una base teórica constructivista del riesgo, enfoque que releva el rol de la comunicación, la interpretación y las dinámicas sociales generadas en los territorios y amenazas y partir de metodologías cualitativas con enfoque transdisciplinario y cuantitativas, como aplicación de un cuestionario, se describe la percepción social de mujeres habitantes de la región de la Araucanía en torno a las amenazas volcánicas.

El levantamiento de información se realizó entre marzo y septiembre de 2023 y contó con la participación de 55 jóvenes y mujeres entre 15 y 65 años habitantes de las comunas pertenecientes al geoparque Unesco Kütralkura (Melipeuco, Lautaro, Lonquimay, Cunco, Curacautín, Curarrehue, Vilcún).

Dentro de los resultados preliminares se destaca una diferencia de percepción de acuerdo a rango etario y proximidad a un volcán. Esto porque las jóvenes que viven más alejadas como en Curacautín o Lautaro presentan una percepción más baja sobre el riesgo volcánico, que aquellas que residen en zonas como Lonquimay o Melipeuco. Además, se identificó un mayor conocimiento y manejo de información sobre erupciones previas entre mujeres mayores a 30 años, lo que contrasta con un bajo manejo de información crítica entre jóvenes de 15 y 18 años. De igual forma, la mayoría de las participantes declara no encontrarse preparada para enfrentar una erupción volcánica y no conocer cómo la brecha de género afecta a mujeres en caso de peligro volcánico. En cuanto a las narrativas culturales se incluyen las erupciones del Volcán Lonquimay de 1988 (cráter navidad) o del Calbuco (2015) como eventos articuladores crítico de sus experiencias.

Palabras Clave: percepción del riesgo, volcanismo activo, género, mujeres.

Financiamiento: Proyecto ciencia pública cp22-p189 siguiendo las huellas de los gigantes de kütralkura y Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, CEGA, Departamento de Geología, FCFM.

Referencias:

- Albertini, R., G. Cárdenas-Jirón, J. Babel, G. Díaz Véliz, J. Eyzaguirre, A. Labra y R. Lewin (2005). Enseñanza de las ciencias a nivel escolar y formación en ciencia en el pregrado universitario. En Ureta, T., J. Babul, S. Martínez y J. Allende. Análisis y Proyecciones de la Ciencia Chilena 2005. Academia de Ciencias.
- Bello A. (2020) Las mujeres en Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas en América Latina y el Caribe. ONU Mujeres, 98.
- Blaikie, N. (1993). Approaches to social enquiry Cambridge the Polity Press.
- Cortassa, C. (2012). La ciencia ante el público. Dimensiones epistémicas y culturales de la comprensión pública de la ciencia.
- Neumayer E. and Plümpert T. (2007) The gendered nature of natural disasters: The impact of catastrophic events on the gender gap in life expectancy, 1981-2002. Ann. Assoc. Am. Geogr. 97, 551-566.
- Windschitl, M. (2003). Inquiry Projects in Science Teacher Education: What Can Investigative Experiences Reveal About Teacher Thinking and Eventual Classroom Practice? Science Education, 87, 112-143.

Microzonificación de peligros en el Volcán Villarrica: metodología y resultados preliminares

Franco Vera¹, Felipe Flores¹, Laura Bono¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Santiago, Chile

El volcán Villarrica, ubicado entre las regiones de La Araucanía y Los Ríos, está clasificado como el sistema volcánico de mayor riesgo en Chile. Su alta frecuencia eruptiva y el constante aumento de la población que habita sus alrededores, han atraído la atención de científicos y autoridades por el potencial impacto que sus procesos pueden causar. En este sentido, el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) publicó el año 2000 el primer mapa de peligros para el volcán Villarrica, a escala 1:75.000, cuyo objetivo principal fue otorgar un insumo para la atención de emergencias en caso de una erupción.

Tras el paso de más de 2 décadas, con el desarrollo de nuevas herramientas de simulación y de topografía de mayor resolución, la evaluación de peligros ha transitado hacia un análisis de mayor detalle, como es el caso de mapas basados en escenarios de corto plazo (mapas de peligros dinámicos) y evaluaciones de puntos de encuentro transitorio para la elaboración de planes de emergencias. En la actualidad, debido al aumento explosivo de la población en la zona, se ha hecho necesario mejorar el detalle cartográfico, con el fin de entregar mayores antecedentes para la correcta planificación territorial.

En este trabajo presentamos una microzonificación en la evaluación de peligros del sector norte del volcán Villarrica, comuna de Pucón, a través de la confección de un mapa integrado de peligros volcánicos a escala 1:25.000. La metodología utilizada consistió en: 1) mejorar la resolución del catastro eruptivo Holoceno, a través del levantamiento de nueva información volcanológica, nuevas edades radiométricas y análisis geoquímicos; 2) realizar una caracterización morfométrica de valles, mediante el análisis de un modelo de elevación digital de alta resolución (1 m/píxel); 3) aplicar modelos numéricos probabilísticos y determinísticos (ej. Q-Lavha, EcMapProb, BoxMap, Laharflow, Ramms, LaharZ, TephraProb y Ballistics); y 4) integrar zonas de susceptibilidad a través de una matriz semicuantitativa con parámetros de recurrencia y potencial de impacto.

En esta instancia se entregarán resultados preliminares de la microzonificación de peligros del volcán Villarrica, los que serán acompañados por una discusión sobre los desafíos y avances de las nuevas metodologías para el análisis e integración de peligros a escalas de mayor detalle.

Palabras Clave: Peligros volcánicos, Volcán Villarrica, Microzonificación de peligros, Gestión del Riesgo, Mapa de peligros.

Análisis de peligros en zonas de volcanismo distribuido: casos del Grupo Volcánico Descabezados y el Complejo Volcánico Antillanca

Franco Vera¹, Constanza Jorquera², Álvaro Amigo¹, Lizette Bertin¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica

(2) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología Aplicada, Oficina Técnica de Coyhaique

Las áreas de volcanismo distribuido se caracterizan por tener una amplia variedad de estilos eruptivos, lo que, sumado a la dispersión espacial de sus centros de emisión, complejiza la evaluación de sus peligros y el manejo del riesgo volcánico. En este trabajo, analizamos el peligro volcánico relacionado a dos áreas: Grupo Volcánico Descabezados (GVD), en la Región del Maule, y complejo volcánico Antillanca (CVA), en la Región de Los Lagos.

El GVD consiste en una agrupación de 18 centros de emisión concentrados en un área aproximada de 450 km², dentro de los que se encuentran los volcanes Descabezado Grande, Quizapu, Cerro Azul, Mondaca, Las Resolanas y Hornitos. Su principal característica es su amplia variedad composicional (desde 49 hasta 73% SiO₂) y su actividad eruptiva histórica, en la que destacan 2 erupciones de ca. 5 km³ de magma en los últimos 200 años. Por otro lado, el CVA consiste en una agrupación de ca. 70 centros de emisión en un área de 550 km², principalmente máficos, sin actividad histórica reportada, pero con evidencia de al menos 2 grandes erupciones (IEV >4) en los últimos 3 ka AP. En ambos casos, se realizó un análisis de peligros a través de una caracterización eruptiva postglacial y aplicación de modelos numéricos probabilísticos y determinísticos. Asimismo, se realizó un proceso de jerarquía analítica a través de juicios de expertos, para determinar las zonas con mayor probabilidad de hospedar un nuevo centro de emisión en el futuro.

Los resultados indican que el GVD presenta una alta variabilidad de estilos eruptivos y de volúmenes asociados a sus erupciones. Las zonas que podrían tener un mayor impacto debido a sus procesos, además de su zona proximal, son los valles de los ríos Maule, Blanquillo y Lontué, mientras que el área de mayor probabilidad de aparición de un nuevo centro de emisión es el flanco norte del estratovolcán Descabezado Grande, debido a la alta concentración de sismicidad histórica, surgencias de fluidos hidrotermales y de centros de emisión holocenos. El CVA en tanto, tiene un alto potencial para afectar la conectividad de la ruta internacional del Paso Cardenal Samoré, que une a Chile con Argentina, y las actividades productivas asociadas al turismo y a la generación eléctrica. Su zona de mayor susceptibilidad volcánica es el área aledaña al volcán Casablanca y la parte central del complejo, debido a la concentración de centros eruptivos menores de edad Holoceno reciente y a estructuras con orientación NO-SE que, probablemente, han favorecido el ascenso magmático.

En este trabajo presentamos los resultados de la evaluación de peligros volcánicos de ambos sistemas, con énfasis en los desafíos que presenta este análisis en zonas de volcanismo distribuido.

Palabras Clave: volcanismo distribuido, Descabezados, Antillanca, Andes del Sur.

ÁREA TEMÁTICA 6: GEOCIENCIA Y SOCIEDAD



Comunicación inclusiva de las geociencias: El derecho al saber

Natalia Isabel Astudillo Leyton¹, Camilo Sánchez Yañez², Felipe Espinoza González¹, Edwin González Abarca¹

(1) Servicio Nacional de Geología, SERNAGEOMIN, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avda. Santa María #0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Universidad Mayor, Geología, Facultad de Ingeniería, Manuel Montt #367, Providencia, Santiago, Chile

La Ley 20.422 que establece normas sobre igualdad de oportunidades e inclusión social de personas en situación de discapacidad (PcD), implica accesibilidad y el diseño universal para todos, por ejemplo, el acceso pleno al conocimiento, para así eliminar barreras impuestas por la sociedad que les impiden interactuar plenamente en el contexto en que se desenvuelven. En lo que refiere a geociencias, nuestra intrincada geología entrega un escenario privilegiado para su enseñanza y aprendizaje, considerando como recurso el contacto con el medio natural que nos rodea. Para las personas en situación de discapacidad (PcD) esta oportunidad de aprendizaje y el acceso a contenidos relacionados a geociencias son limitados, porque las iniciativas dirigidas a ellos son aisladas y desarticuladas. En Chile, las personas adultas con discapacidad alcanzan al 17.6% de la población, mientras que los niños entre 2 y 17 años con esta condición son corresponden al 14.7% de este segmento, según la Encuesta Nacional de Discapacidad y Dependencia, ENDIDE 2022*.

En este trabajo proponemos a la comunidad geológica algunas estrategias y líneas de acción respecto al desarrollo de información accesible a PcD, orientadas a Paleontología y Geopatrimonio, con el objetivo de multiplicar la cultura inclusiva respecto de la entrega de estos contenidos con adecuaciones, fomentando la interacción y participación de PcD en la definición conjunta de contenidos orientados hacia temáticas geológicas de su interés ("nada sobre nosotros sin nosotros"), para que así el conocimiento se para todos.

PALEONTOLOGÍA

En la actualidad, se ha vuelto protagonista dado el interés transversal que despierta, por lo que sería idónea para generar proyectos con una componente inclusiva dentro de su estrategia comunicacional, como es el caso de la astronomía (Holbrook, 2020).

Más allá de la curiosidad que despiertan los dinosaurios, la posibilidad de comunicar acerca de descubrimientos paleontológicos en Chile a PcD, requiere utilizar herramientas del Diseño Universal de Aprendizaje (DUA) y adecuaciones dirigidas a esta comunidad o, más aún, a la diversidad. Trabajos en esta línea han sido realizados en Estados Unidos y Europa y, más aún, hay un destacado geólogo y paleontólogo con discapacidad visual, Geerat J. Veermeij, quien propuso la 'hipótesis de la evolución por escalada' (Veermeij, 1987).

Asociado al proyecto "Geología y Discapacidad" de SERNAGEOMIN se desarrollaron dos iniciativas de comunicación inclusiva vinculadas a la paleontología. La primera, en conjunto con "Astronomía Inclusiva", consistió en una charla 'on-line' sobre dinosaurios chilenos para PcD visual inscritas en Bibliociegas, con herramientas del 'storytelling' y auditivas. La segunda, dentro de la estrategia comunicacional del Plan Nacional de Geología, es una infografía relativa a la misma temática, dirigida a RRSS y plataformas web, diseñada con algunas herramientas DUA y códigos QR, para acceder a información en formato audio.

Un tópico que dificulta la comunicación inclusiva de las ciencias de la tierra es el 'lenguaje científico'. Si bien se han logrado simplificar algunos términos frecuentes, estos esfuerzos aún son incipientes. Por lo tanto, es necesario generar un trabajo conjunto con PcD y profesionales de la educación, salud e inclusión, para definir problemáticas en base a sus inquietudes y desarrollar soluciones en ese ámbito.

GEOPARQUES Y GEOPATRIMONIO

El reconocimiento de los Geoparques tiene, entre sus objetivos, gestionar la educación y desarrollo sostenible dentro de su área geográfica, por lo que la divulgación debe contemplar a toda la comunidad del territorio. Esto permite que los contenidos sean incorporados al saber social, visibilizando problemáticas y soluciones locales y contribuyendo a una construcción cooperativa del conocimiento territorial.

La divulgación de la geología en los geoparques debe realizarse sin distinciones, enfatizando su rol social, incorporando adecuaciones a PcD y hacia la diversidad: comunidades indígenas y rurales, adultos mayores, etc. En general, estos son grupos vulnerables poco considerados en iniciativas de comunicación científica, por lo que estos trabajos son una oportunidad emblemática respecto de la inclusión y democratización del conocimiento. En este escenario, se pueden generar herramientas dirigidas a PcD incorporando, por ejemplo, conceptos inherentes al Turismo Sensorial (Landeta-Berajano et al., 2018), como rutas geológicas simplificadas, geositos con información accesible; una aplicación georreferenciada, que en ubicaciones de interés acceda a videos con interpretación a Lengua de Señas Chilena y subtítulos, señalética inclusiva, charlas con adecuaciones a PcD sensorial o mental, entre otras.

Palabras Clave: Inclusión, accesibilidad, discapacidad, paleontología, geoparques.

Financiamiento: Este trabajo se enmarca dentro del Plan Comunicacional de Geología, del Departamento de Geología General, SERNAGEOMIN.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Erika Labbé, coordinadora de difusión del Instituto de Estudios Astrofísicos UDP, por el interés demostrado para impulsar trabajos conjuntos en esta línea.

Referencias:

- Holbrook, J., 2020. Using Cultural Astronomy to Create a More Inclusive Astronomy. American Astronomical Society meeting #235, id. 347.02. Bulletin of the American Astronomical Society, v.I. 52, n.1 Landaeta-Bejarano, N., Vásquez-Farfán, B. y Ullauri-Donoso, N., 2018.
- Vermeij, G. J., 1987. Turismo sensorial y agroturismo: Un acercamiento al mundo rural y sus saberes ancestrales. Revista Investigaciones Sociales, v.4, n.11 46-58. Evolution and Escalation: An Ecological History of Life. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv18zhf8b>.
- *Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Servicio Nacional de la Discapacidad (SENADIS), Servicio Nacional del Adulto Mayor (SENAMA), 2023. ENDIDE, Encuesta de Discapacidad y Dependencia 2022. Prevalencia de discapacidad y dependencia en personas adultas y personas mayores. Enero de 2023. [http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/endide/230128_Resultados_ENDIDE_2022_\(Poblacion-adulta\).pdf](http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/endide/230128_Resultados_ENDIDE_2022_(Poblacion-adulta).pdf).

Colección inclusiva de rocas, minerales y fósiles de SERNAGEOMIN: Consideraciones y adecuaciones para hacer la geología accesible para todos

Natalia Isabel Astudillo Leyton¹, Pas Toledo Rubilar², Felipe Espinoza González¹, Samuel Medina Letelier⁴, Victoria Troncoso Labraña⁵, Daniela Villela¹, Edwin González Abarca¹, Jimena Arraño³, José Ramírez³

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Santa María #0104, Santiago, Chile

(2) Instituto para la Resiliencia ante Desastres, ITREND, La Concepción #191, Providencia, Santiago, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, Departamento Laboratorios, Til Til #1993, Ñuñoa, Santiago, Chile

(4) Universidad del Desarrollo, Geología, Facultad de Ingeniería, Avda. Plaza #680, Las Condes, Santiago, Chile

(5) Universidad Andrés Bello, Geología, Facultad de Ingeniería, República #239, Santiago, Santiago, Chile

MARCO TEÓRICO

Un recurso fundamental utilizado para la enseñanza y aprendizaje de las geociencias es el contacto con el medio natural que nos rodea. Esto tiene su base en la Teoría de Integración Sensorial, que nos entrega evidencias acerca de la habilidad para recibir, procesar información del medio que es percibida por nuestros sentidos: vista, oído, olfato, gusto, tacto, propioceptivo, vestibular e interocepción.

En base a esta definición, podemos alcanzar cualquier objetivo de aprendizaje bajo la premisa de que quienes nos enseñen sean capaces de diseñar la entrega de contenidos y material bajo los principios del Diseño Universal de Aprendizaje (DUA, Alba Pastor, 2018) y realizar adecuaciones a los mismos, ambos en atención a la diversidad. Lo anterior determina el enfoque principal de la propuesta que presentamos en este trabajo: la selección de material geológico al que se le puedan incorporar adecuaciones apoyadas en la percepción sensorial y emocional.

Chile es un verdadero laboratorio natural, dada su intrincada configuración geológica, por lo que en la actualidad han surgido diferentes iniciativas de divulgación para educar a la población sobre esta temática. Sin embargo, la información sobre geociencias dirigida a personas en situación de discapacidad (PcD) y quienes interactúan con ellos es aún escasa o inaccesible. Esto dificulta incorporar su perspectiva en la construcción de iniciativas y conjuntas con la comunidad geocientífica e instituciones, porque se dificulta su participación y el diálogo simple y abierto en este ámbito ("nada sobre nosotros sin nosotros"). Cabe considerar que el último estudio del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, ENDIDE 2022, indicó que el porcentaje de PcD es del 17.6%, aproximadamente 2.703.893 personas. Por lo tanto, es fundamental diseñar estrategias para que el conocimiento geocientífico disponible sea para todos en igualdad de condiciones, disminuyendo las barreras de accesibilidad (Ley 20.422, de Accesibilidad Universal).

PLAN COMUNICACIONAL DE GEOLOGÍA

Una de las misiones del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) es "generar, mantener y divulgar información de geología básica y de recursos y peligros geológicos del territorio nacional, para el bienestar de la comunidad y al servicio del país". Aunque, en general, esto se cumple, esta información no ha sido diseñada ni adaptada para las PcD, dada la naturaleza principalmente técnica de las funciones que cumplen sus profesionales, cuya preparación es limitada en temáticas como comunicación de la ciencia, inclusión y accesibilidad, entre otras. Para impulsar la difusión y divulgación de las geociencias de la institución, ha surgido el "Plan Comunicacional de Geología" (Villela et al., este congreso), donde un equipo de profesionales desarrolla contenidos y organizan actividades para la comunidad geológica y públicos objetivos diversos. Esto permite acercarlos a la población, convirtiéndose en una importante vía de comunicación de información geológica.

En el marco de esta iniciativa, se lleva a cabo el proyecto "Geología y Discapacidad", donde se están diseñando estrategias y lineamientos para que nuestra información geológica sea para todos, como videos educativos, infografía, entre otras. Una de estas actividades ha consistido en generar y mantener una colección de rocas, minerales y fósiles de SERNAGEOMIN dirigida a la divulgación, pero con conceptos de Diseño Universal de Aprendizaje y adecuaciones vinculadas a la componente sensorial, orientadas a discapacidad visual, infancia y adultos mayores, en su primera etapa. Su construcción se ha basado en las propiedades organolépticas ("descripción de las características físicas de la materia que se pueden percibir con los sentidos") y, principalmente, hápticas de algunos de estos materiales. Trabajos similares han sido anteriormente documentados, en el área de la Geología, por autores como Gómez-Heras et al. (2014) y López-Acevedo et al. (2020), exhortado además la importancia de implementar el DUA en la enseñanza de las geociencias, como Higgins y Maxwell (2021).

DESARROLLO DE LA INICIATIVA

En primer lugar, se estableció un protocolo de selección de muestras, cuyas características permiten dirigirlas a públicos objetivos específicos. Por ejemplo, minerales con cristales bien formados, de colores y tamaños reconocibles, hábitos distintivos, entre otros, así como rocas plutónicas, volcánicas, sedimentarias, metamórficas y alteradas con texturas distintivas (vesiculares, moteadas, estratificadas), que presenten estructuras y formas que sean atractivas y que permitan, entonces, vincularlas con otros contenidos geológicos.

Por otro lado, este material, además de poder formar parte de exposiciones itinerantes (implicando consideraciones de tamaño), debe presentar una característica especial: la posibilidad de manipulación por los usuarios, por lo que es necesario una política de registro y reemplazo de los especímenes, que considere daño y pérdidas. Este es el caso, por ejemplo, de la calcita y galena, que contempla hacerlas caer o romperlas para mostrar su fragilidad o exfoliación en 3 direcciones. Esto parte bajo la premisa de que todos, cuando

FÓSILES

Dado el objetivo de la colección, se utilizaron moldes de fósiles de yeso, porque estos especímenes sí pueden ser manipulados, a diferencia de los ejemplares reales, que deben ser resguardados ya que tienen valor patrimonial. Algunos de estos moldes ya existían previamente en la Unidad de Paleontología y Biocronología de SERNAGEOMIN, los que fueron revisados e incorporados a la misma. Respecto a su identificación háptica, se han realizado pruebas, principalmente, con bivalvos y amonites, introduciendo conceptos que permiten su identificación en el quehacer habitual geológico, como asimetría y valvas, ornamentación, enrollamiento, tubérculos y costas, etc. Su presencia permite también introducir nociones de Tiempo Geológico, ambiente y extinciones.

Dada la curiosidad que generan los fósiles de vertebrados (ej. dinosaurios), asociado a esta colección también se incorporó un ejemplar del libro "Nuestro patrimonio paleontológico. Fauna Prehistórica de Chile" (CMN y Ministerio de las Culturas, Artes y Patrimonio, 2019), cuya versión inclusiva, con contenidos en braille e imágenes texturadas, están dirigidos a PcD visual. Los dinosaurios es un contenido de amplia repercusión en distintos públicos objetivos, lo que se verifica, por ejemplo, en estudiantes con condición TEA, ya que, en base a sus intereses restrictivos (Sherratt, 2002), se vuelven "mini especialistas" en estos tópicos. Ellos podrían ver beneficiado su aprendizaje, al establecer relaciones temporales con invertebrados, de mayor prevalencia y mejor estado de conservación en nuestro país.

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LA COLECCIÓN

En primera instancia, se realizó una revisión exhaustiva de la bodega de muestras de SERNAGEOMIN, donde existen rocas que, en base a los protocolos institucionales, su permanencia en bodega es evaluada después de un periodo prolongado de residencia. Esto permitió identificar rocas y minerales susceptibles de ser integrados a la colección de divulgación, bajo los criterios anteriormente definidos. La tarea de recolectar muestras dirigidas a la parte inclusiva de la colección ha involucrado un trabajo más minucioso, porque requiere más inversión de recursos -tiempo, económicos y humanos- en pro de su enriquecimiento.

La clasificación y selección de especímenes ha contado con el apoyo de estudiantes en práctica, quienes han colaborado en la construcción de la propuesta de un catálogo que facilite la selección de muestras enfocadas a actividades específicas de divulgación institucionales donde se soliciten. Además, en conjunto, se han generado descripciones simplificadas del material con enfoque a públicos objetivos diversos. El almacenamiento de la colección, en su estado actual, está en manos del Departamento Laboratorios de SERNAGEOMIN y depende también de profesionales del Plan Comunicacional de Geología.

La colección de divulgación (general e inclusiva) de rocas, minerales y fósiles antes descrita, ha sido ya utilizada en tres instancias de divulgación de SERNAGEOMIN: (1) Feria de la Geodiversidad, llevada a cabo en el cerro Santa Lucía en octubre, 2022; (2) Feria de Divulgación Volcánica, realizada en San Pedro de Atacama, en abril, 2023 y (3) Día de los Patrimonios, cerros Santa Lucía y San Cristóbal, en mayo, 2023 (Figura 1c, b y a, respectivamente). Estas han despertado un amplio interés en diferentes públicos objetivos, los que se sorprenden gratamente al poder tocar y manipular las muestras de esta colección, principio fundamental para el funcionamiento de la misma.



Figura 1: Diferentes instancias donde se ha testeado la colección de rocas, minerales y fósiles dirigida a divulgación, orientada a diferentes públicos.

PERSPECTIVAS FUTURAS Y TRABAJOS A REALIZAR

Es importante mantener una actualización constante del número de muestras que forman parte de esta colección, dada la premisa a partir de la cual se construyó. Asimismo, debe generarse un protocolo de solicitud de la misma, para determinar responsabilidades respecto del material seleccionado y su restitución. Cabe considerar que falta completar parte de la colección inclusiva, para así hacer un testeo en una instancia de PcD visual.

Para complementar su comprensión dirigida a PcD visual, se podrían incorporar otras adecuaciones, como placas explicativas de muestras seleccionadas en braille, con lenguaje simplificado. También usar códigos QR que dirijan a contenidos auditivos, permitiendo ampliar el público objetivo de nuestra colección hacia otras discapacidades (por ejemplo, videos en lengua de señas chilena) y, a mediano plazo, hacia la diversidad. Finalmente, proponer la generación de un catálogo inclusivo que incluya contenidos básicos de geología relacionados a la formación de rocas, minerales y los fósiles que forman parte de esta colección.

Palabras Clave: inclusión, geociencias, discapacidad visual, hápticas, organolépticas.

Financiamiento: Este trabajo está siendo desarrollado por profesionales de SERNAGEOMIN, en base a su estrategia institucional.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los profesionales que han realizado aportes a esta colección de manera desinteresada y que han confiado en nuestro criterio de construcción para utilizarla.

Referencias:

- Alba Pastor, C., 2018. Diseño Universal para el Aprendizaje: educación para todos y prácticas de enseñanza inclusivas. Morata Ed. (2018), España. 128 p.
- Ayres, A.J., 1979. Sensory Integration and the Child. Los Angeles, CA: Western Psychological Services.
- Bundy, A.C., Murray, A.E., 2002. Sensory integration: A. Jean Ayres' theory revisited. In: A. C.
- Bundy, S. J. Lane, & E. A. Murray (Eds.), Sensory integration: Theory and practice (2nd ed., pp. 3-33). Philadelphia: F.A. Davis.
- Gómez-Heras, M., Gonzalo Parra, L., García-Frank, A., Sarmiento, G. N., González Acebrón, L., Muñoz García, M.B., García Hernández, R., Hontecillas, D., Ureta Gil, M.S., Canales Fernández, M.L., 2014. Geología para sordo-ciegos: una experiencia multisensorial para la divulgación de la ciencia. El CSIC en la escuela: investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula, 10, p. 45-55.
- López-Acevedo, V., Pilán Asian, M.D., Alcalde-Fuentes, M.R.; López-Andrés, S., Goñi, J., Chicote, J.C., 2020. Método didáctico inclusivo para el reconocimiento háptico de minerales, rocas y fósiles: diseño y claves pedagógicas (Parte I) Experiencias e ideas para el aula. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2020 (28.2) – 189-198.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Servicio Nacional de la Discapacidad (SENADIS), Servicio Nacional del Adulto Mayor (SENAMA), 2023. ENDIDE, Encuesta de Discapacidad y Dependencia 2022. Prevalencia de discapacidad y dependencia en personas adultas y personas mayores. Enero de 2023.
- [http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/endide/230128_Resultados_ENDIDE_2022\(Poblacion-adulta\).pdf](http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/endide/230128_Resultados_ENDIDE_2022(Poblacion-adulta).pdf).
- Sherratt, D., 2002. Developing pretend play in children with autism. Autism. SAGE Publications and The National Autistic Society, 2022. 6 (2) 169–179; 023361 1362-3613(200206) 6:2.
- Villela, D., González, E., Espinoza, F., Astudillo, N., Venegas, C., Donoso, C., Salazar, E., Oliva, P., Villa, V., Vásquez, P., Fuentes, F., Pérez, E. 2023. (Este congreso).

Influencia de los Procesos Geológicos y Meteorológicos en la Cosmovisión Mapuche

Cristian Andrés Bastías Curivil¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

Se dan a conocer los antecedentes y los resultados de una investigación orientada a determinar la posible influencia de los fenómenos naturales estudiados por las Ciencias de la Tierra, vale decir, los terremotos, los tsunamis, el volcanismo, los lahares, los desbordes de lagos y ríos, y las trombas marinas y/o tornados, que influyeron decisivamente en la Cosmovisión Mapuche. Se analizó una gran variedad de mitos y leyendas de este pueblo, que abarca territorialmente desde las costas chilenas del Pacífico hasta la Cordillera Principal, entre las Regiones del Biobío y Los Lagos de nuestro país. El principal concepto unificador utilizado para vincular esos fenómenos con la Cosmovisión Mapuche es la Geomitología, término propuesto en 1968 por la geóloga estadounidense Dorothy Vitaliano, tras sus estudios de la mitología grecorromana en el entorno del Mar Mediterráneo. Este concepto permite enmarcar a los mitos y leyendas de un pueblo, en este caso el pueblo mapuche, como respuestas culturales frente a los eventos naturales, generando y, a la vez, retroalimentando su visión de mundo o Cosmovisión, y dando sentido a sus tradiciones y saberes culturales.

En esta investigación se hizo uso de conceptos y términos propios de las Ciencias Sociales, como: las definiciones de Mito, Leyenda, Mitología, Sincretismo, Numinosidad, Liminidad y Antropomorfismo, los planteamientos teóricos de Lévi-Strauss para abordar el estudio mitológico, aspectos de la Cosmovisión Mapuche basados principalmente en los estudios de la María Ester Grebe, y una revisión geológica de los terremotos que ocurren y ocurrieron en la región mapuche, los tsunamis, los lahares, los fenómenos volcánicos tales como los gases volcánicos, la lluvia de tefra y los proyectiles balísticos volcánicos, las cúpulas y domos de lava, aspectos de las teorías de la acreción planetaria y la conservación del calor interno del planeta, la caída de meteoritos, las trombas marinas y los tornados, con la idea de facilitar el entendimiento e interpretaciones geológicas de los mitos y leyendas mapuche recopilados.

En la mitología mapuche se hace muy frecuentemente mención a seres personificados como culebras, en que particularmente destaca el mito de la pugna entre Trentén y Kaikai vilú, que son dos culebras y/o serpientes que simbolizan la tierra y el agua, respectivamente. Como resultados de este trabajo, se ha podido establecer la estrecha relación entre las fallas y lineamientos costeros con las ubicaciones de los cerros denominados Trentén y Kaikai, que hacen alusión a la pugna de estos dos seres míticos, permitiendo entender desde la Geología, porqué en este mito mapuche se menciona frecuentemente desde tiempos antiguos que estos cerros se alzaban frente a las inundaciones provocadas por los tsunamis costeros. De manera subordinada a este mito, en otros relatos se detectó cómo el avance de una colada de lava se asocia a una culebra mortífera. De igual manera, se aborda como los tornados y trombas marinas eran fenómenos conocidos por el pueblo mapuche, quedando también mitificados en sus relatos orales como manifestaciones de Kaikai. Este estudio ha permitido ampliar el registro histórico de estos eventos meteorológicos en el país. Además, otro resultado destacable es la comprensión de por qué los terremotos y los fenómenos volcánicos como los lahares, que provocan tsunamis lacustres y desbordes de los lagos y ríos, eran conocidos y a la vez temidos por los mapuche, generando una exquisita mitología cordillerana que buscaba explicarlos. En relación con la zona costera, se propone tentativamente la posible relación entre la Piedra Cruz, que es un mineral conocido en la mineralogía como quastolita, con el diseño dibujado en los cueros del kultrún, instrumento musical usado por las machi en sus rituales de sanación y de rogativa por mejores cosechas y peticiones de buena salud para los miembros de la comunidad mapuche. Estos resultados muestran claramente cómo los eventos geológicos y meteorológicos se reflejan en el corpus mitológico del Pueblo Mapuche.

Palabras Clave: Geología, Riesgos Geológicos, Meteorología, Geomitología, Cosmovisión Mapuche

Financiamiento: Proyecto Fondecyt N° 1161806 "From top to Bottom: deciphering the controlling mechanism for andean mountain building in central Chile-Argentina", y Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Agradecimientos: A los profesores de mi comisión: Reynaldo Charrier, Francisco Hervé, Luis Aguirre, Claudio Millacura y Marcelo Farías. A Roberto Rondanelli, a Luis Maribur, y finalmente a mi familia y amigos.

Referencias:

- Bastías, C. A. (2019). Influencia de los Procesos Geológicos en la Cosmovisión Mapuche, entre Concepción y Chiloé [Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175020>.
- Bastías, C. A., Charrier, R., Millacura, C. V., Aguirre, L., Hervé, F., & Farías, M. A. (2021). Influence of Geological Processes in the Cosmovision of the Mapuche Native People in South Central Chile. *Earth Sciences History*, 40(2), 581-606. <https://doi.org/10.17704/1944-6187-40.2.581>.
- Bastías, C.A., Rondanelli, R., Charrier, R. (En preparación) Tornados y trombas marinas en Chile entre los años 1540 al 2023. Una perspectiva histórica y geomitológica.
- González, A. (2018). La invención de la cosmovisión mapuche y la antropología de María Ester Grebe [Memoria para optar al Título de Antropólogo Social. Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189076> Grebe, M. E., Pacheco, S., & Segura, J. (1972). Cosmovisión Mapuche. Cuaderno de la Realidad Nacional, 14, 46-73. <https://archivomariaestergrebe.cl/publicaciones/articulos/1972-Cosmovision-Mapuche.pdf>.
- Hamacher, D. (2011). On the Astronomical Knowledge and Traditions of Aboriginal Australians [Macquarie University. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. <http://www.aboriginalastronomy.com.au/wp-content/uploads/2018/05/Hamacher-Thesis.pdf>.
- Lévi-Strauss, C. (1986). Mito y significado (H. Arruabarrena (trad.)). Alianza Editorial. Lévi-Strauss, C. (1997). El Pensamiento Salvaje (2° ed.). Reimpresión. Fondo de Cultura Económica.
- Vitaliano, D. (1968). Geomithology: The Impact of Geologic Events on History and Legend with Special Reference to Atlantis. *Journal of the Folklore Institute*, 5(1), 5. <https://doi.org/10.2307/3813842>.
- Vitaliano, D. (1994). Leyendas de la Tierra (L. Pla (trad.)). Salvat Editores S.A.

Análisis de factores geológicos en el desarrollo de Planes Integrales de Seguridad Escolar (PISE) en Chile. Caso de estudio: Colegio Altamira, comuna de Peñalolén, Santiago

María Fernanda Miras Núñez¹, Natalia Astudillo-Leyton², Camilo Sánchez Yáñez¹⁻³

(1) Cobrizo Geología Ambiental, Rucalhue 730, Linares, Chile

(2) SERNAGEOMIN, Santa María 0104, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Geología, Ciencias, Av. Manuel Montt 367, Santiago, Chile

En Chile muchos de los fenómenos socionaturales son consecuencias de su compleja geología y geomorfología. Como consecuencia, su ocurrencia como la potencial generación de pérdidas o daños se ha atribuido a planificaciones urbanas y territoriales deficientes. Es por esto, que es fundamental considerar una adecuada gestión de riesgo de desastres, que integre el conocimiento, la generación de medidas y estrategias para mitigar y enfrentar nuevos eventos de emergencias, particularmente, enfocadas en el ciclo del riesgo; prevención, reacción y reconstrucción/rehabilitación.

En esta línea, un instrumento desarrollado en Chile que se aplica en establecimientos escolares es el Plan Integral de Seguridad Escolar (PISE), el cual promueve una actitud de autocuidado y prevención, propiciando un ambiente seguro para la comunidad escolar. Sin embargo, la diversidad geológica chilena es escasamente considerada y por ende, la información previa asociada a fenómenos socionaturales. En este trabajo se plantea que la integración del conocimiento geológico en la construcción del PISE promueve la resiliencia, en particular, en estudiantes con discapacidad, ya que conociendo el origen, desarrollo y las consecuencias de un peligro geológico, se puede reaccionar de mejor forma cuando estos ocurren, aumentando capacidades y disminuyendo vulnerabilidades.

Esta investigación abordó como caso de estudio el colegio Altamira, ubicado en la comuna de Peñalolén, Santiago, el que se encuentra bajo la quebrada "Nido de Águilas", y a la traza de la Falla San Ramón. Por lo tanto, propensa a desastres vinculados a peligros geológicos como sismos, aluviones e inundaciones. Es un colegio inclusivo, donde aproximadamente el 24% de sus alumnos presentan discapacidad, como Trastorno del Espectro Autista, Síndrome de Down, discapacidad motora, y más.

En la elaboración de las actividades realizadas en el establecimiento se utilizó el diseño universal del aprendizaje, con el fin de acercar la temática a toda la comunidad, incorporando conceptos geológicos desde una perspectiva visual, auditiva y sensorial. La evaluación del aprendizaje se llevó a cabo por medio de encuestas de diagnóstico y post-actividades. Con esta información se generó una base de datos acerca de sus conocimientos de peligros geológicos. En simultáneo, se realizó un análisis estadístico etario, de género y de trayecto según la comuna de residencia.

Del análisis comparativo entre ambas encuestas, se deduce que los estudiantes participantes de las actividades presenciales aumentaron sus respuestas correctas respecto de los contenidos geológicos entregados. Aquellos estudiantes que sólo vieron los afiches mantuvieron o aumentaron pocos puntos en su asertividad. Esto se refleja principalmente en las preguntas de peligros geológicos como por ejemplo: "¿qué es un aluvión?", ya que en los niveles de 5° y 6° básico, con actividades presenciales, la diferencia de respuestas correctas entre encuestas varía en 40% más que otros cursos con un aumento menor. Para el análisis se consideraron las nociones que ya debieran manejar en sus respectivos niveles según las Bases Curriculares del MINEDUC. Por ende, no se refleja un aprendizaje previo de las respuestas dadas, indicando una evidente ausencia de conceptos ligados a las ciencias de la tierra.

Respecto de las comunas de proveniencia de cada estudiante, se deduce que existe un mayor índice de respuestas correctas de quienes viven en comunas más alejadas, asociado principalmente a que el trayecto está marcado por una mayor cantidad de elementos geológicos, como es el ejemplo de la geomorfología precordillerana. Por otro lado, la evaluación de los resultados en cuestión de género refleja una diferencia positiva para las mujeres en comparación a los hombres en educación media. Sin embargo, el nivel de interés por las geociencias o carreras de STEM es menor en el género femenino, sólo el 5.6% de ellas buscó información relacionada a la materia, en comparación a un 13.4% de los hombres. Gray (2021) menciona que en parte esto es debido a la falta de representación femenina, estereotipos masculinos, y discriminaciones verticales y horizontales desde temprana edad.

En conclusión, el desarrollo del PISE debe incorporar análisis geológicos locales, para comprender los peligros socionaturales desde un punto de vista preventivo e inclusivo, considerando las bases de Kaiser (2013), obteniendo un resultado accesible, participativo, colaborativo y no discriminatorio.

Palabras Clave: Discapacidad, Peligros Geológicos, Gestión de Riesgo de Desastres, PISE

Referencias:

- Gray, R., Riche, A., Shinnick-Gordon, I., & Sample, J. (2021). The reasons women choose and stay in geology major: a qualitative multi-case. *Innovation an Education*, 3:3 DOI: <https://doi.org/10.1186/s42862-021-00010-2>.
- Kaiser, C., Vásquez, A., & Vásquez, D. (2013). Manual de gestión inclusiva de emergencias: Derechos humanos de las personas con discapacidad durante emergencias. Peñaflor, Chile: Universidad Austral de Chile.

Experiencia de supervisoras de sondajes en glaciares de roca de los Andes centrales chilenos

Javiera Carrasco Gálvez¹, Fernanda Manríquez Jaramillo¹

(1) Geoestudios S.A., Los Aromos, 3371, Santiago, Chile

Durante la última década el área de la minería ha fomentado con diversos programas la participación de las mujeres, alcanzando un 12,6% al 2020 (COCHILCO, 2021) del universo de trabajadores. Este escenario es aquel en que nos formamos como profesionales de la geología y nos recibió en nuestra primera experiencia laboral, específicamente en la consultora Geoestudios que brinda servicios desde hace más de 40 años. Esta entrega pretende analizar nuestra experiencia, evidenciando los problemas enfrentados y como se sobrellevaron, con el fin de compartir la dinámica que se vive como geocientíficas en un mundo que fomenta y presume la rápida inserción femenina.

En la última temporada de verano de 2023 estuvimos a cargo de la supervisión de una campaña de sondajes en glaciares de rocas en los Andes Centrales de Chile, siendo las únicas dos mujeres en la campaña, bajo una relación de contraturno. Para llegar a esta situación hubo que sobrepasar diversos obstáculos, siendo el principal la preocupación por parte del cliente de llevar mujeres a terreno en contexto de alta montaña.

Algunas de las aprensiones comunicadas oralmente fueron: las instalaciones sanitarias, capacidad física y accidentabilidad, entendiendo que el cargo implica un mayor trabajo físico. Continuas reuniones entre la empresa y el cliente enfatizaron la necesidad de tener un geólogo/a por turno y que la mejor opción, éramos nosotras. Si bien, los involucrados en el tema entendían que nos encontrábamos bien capacitadas para cumplir con éxito el trabajo encomendado, pasaron tres meses en estas diligencias hasta comunicarnos que definitivamente participaríamos de la campaña en terreno. Una vez anunciada nuestra participación, se presentó un nuevo obstáculo: encontrar equipo de montaña para mujer en verano. La brecha de género en la montaña también se extiende al vestuario, existiendo diferencias importantes entre ropa para cuerpos masculinos como para femeninos, cobrando especial relevancia los temas técnicos de agilidad y ausencia de puntos fríos.

Ante estas adversidades, se presenta el conflicto propio como mujer en las geociencias: una preparación psicológica para realizar labores en la que es imperativo validarse, no solo como profesional en un puesto directivo, sino como persona ante otros y ante una misma, para vencer denominado "síndrome del impostor". Ante esta situación y los obstáculos antes mencionados, se le suma la presión social y autoimpuesta de ser pioneras, en donde, ser las primeras o las únicas visibiliza aún más cualquier desacierto.

Durante la operación se trabajó con la resolución de estos obstáculos: existió preocupación y buena disposición por parte del equipo de terreno y jefatura en temas de conversaciones y comportamiento entre miembros de la campaña. Particularmente, la charla diaria previa al comienzo de la jornada resultó ser una instancia fructífera para la discusión y aprendizaje de todas las partes sobre temas de convivencia. En temas técnicos y profesionales, el equipo completo fue capaz de respetar nuestro rol como supervisoras; y, en tema de montaña y comodidad del campamento, no existió problemas para cumplir con los objetivos del trabajo. Sin embargo, fue en los momentos de distensión y convivencia de grupo en donde las diferencias de género se acentuaron más, tal como en la sociedad en que estamos insertos.

Palabras Clave: Glaciares de rocas, Género, Minería, Andes centrales.

Referencias:

- COCHILCO, 2021. Representación y caracterización de la mujer en el sector minero en Chile, año 2020. Corporación Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, Santiago, Chile. DEPP 20/2021.

Perspectivas de las mujeres en geociencias: Un análisis de las carreras de geofísica y geología en la Universidad de Concepción

Catalina Castro Ibáñez¹, Hayleen Cid Arias¹, Blanca Symmes Lopetegui¹

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

Las mujeres en las áreas STEM (por su sigla en inglés) representan un grupo diverso que aportan al avance científico de un país, contribuyendo en diversas áreas de investigación, docencia y gestión. Ellas enfrentan desafíos en un campo particularmente utilizado por hombres, por lo cual, han tenido que trabajar en disminuir esas barreras y reducir las brechas de género existente en el ejercicio de sus profesiones en la academia y en el ámbito laboral. En Chile la situación no es diferente, según la División de Estudios y Estadísticas del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2020), da cuenta de una disminución en la presencia de mujeres a medida que avanza en los niveles académicos, aunque representa el 55% de la matrícula de pregrado, este porcentaje disminuye a un 51% en programas de magíster y a un 43% en programas de doctorado a nivel nacional. Estas cifras dan cuenta de una brecha de género existente en lo académico, que muestra una disminución en la participación de las mujeres a medida que avanzan en sus carreras. Por otro lado, al 2018 el porcentaje de investigadoras representaba el 34%, las cuales desempeñaban y lideraban actividades de investigación y desarrollo (I+D) a nivel nacional.

El propósito fundamental de esta investigación radica en conocer y comprender de forma profunda las barreras, desafíos y problemáticas que enfrentan las mujeres en sus carreras en geociencias, lo cual permitirá identificar y abordar estrategias efectivas que fomenten la participación femenina, con el fin de reducir brechas de género en todos los niveles académicos y laborales, promoviendo la equidad de género en estas disciplinas científicas. En este trabajo se realizó un análisis de las mujeres egresadas en geociencias, específicamente de las carreras de geofísica y geología de la Universidad de Concepción. Donde se reconocen las motivaciones y decisiones de carrera que tienen las mujeres al momento de optar por estas profesiones, y se cuantifica la proporción de mujeres que, luego de egresar, continúan en la academia en comparación con aquellas que eligen ejercer su carrera en la industria, incluyendo la trayectoria en Chile y en el extranjero, como las motivaciones detrás de ello. Asimismo, se identifican la cantidad de mujeres que abandonan definitivamente el campo de las ciencias de la tierra y se exponen las razones detrás de sus decisiones para entender sus motivos personales. Para llevar a cabo este estudio, se recopilieron datos cuantitativos sobre la proporción de mujeres que continúan en la academia o eligen la industria después de graduarse, así como estadísticas sobre las tasas de abandono de la profesión y la distribución de mujeres en distintos niveles académicos. También, datos cualitativos sobre las motivaciones personales, las barreras percibidas y las experiencias vividas en su entorno profesional, a través de encuestas, donde finalmente se realizó un análisis estadístico con el fin de obtener una visión íntegra de las motivaciones, perspectivas y motivaciones de las mujeres en geofísica y geología.

Los resultados de esta investigación entregan información valiosa sobre las motivaciones, experiencias y perspectivas de un grupo específico de mujeres respecto a su elección de carrera y trayectoria profesional en las geociencias. Estos resultados proporcionan un panorama actualizado de sus roles académicos y laborales como resultado de sus experiencias. Estos resultados contribuirán a concientizar sobre las brechas de género presentes en estas carreras y serán de utilidad para promover cambios hacia un entorno con menos brechas de género. Este estudio hace una invitación a generar un ambiente de discusión con un llamado a tomar acción en torno a políticas que promuevan la igualdad de oportunidades y la participación de las mujeres en disciplinas científicas, tanto en la academia como en la industria.

Palabras Clave: Geociencias, Brechas de Género, Mujeres, Investigación.

Referencias:

- [1] Observatorio de Género en Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2020). Radiografía de género en CTCL [PDF]. Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. <https://www.conicyt.cl/observatorio/wp-content/uploads/sites/2/2020/11/Radiografia-de-genero-en-CTCL.pdf>.
- [2] M. C. Bastarrica, N. Hitschfeld, M. Marques Samary and J. Simmonds, (2018) Affirmative Action for Attracting Women to STEM in Chile, IEEE/ACM 1st International Workshop on Gender Equality in Software Engineering (GE), Gothenburg, Sweden, 2018, pp. 45-48.
- [3] Villaseñor, T., Celis, S., Queupil, J. P., Pinto, L., and Rojas, M. (2020) The influence of early experiences and university environment for female students choosing geoscience programs: a case study at Universidad de Chile, Adv. Geosci., 53, 227-244, <https://doi.org/10.5194/adgeo-53-227-2020>.

Volcanólogas en erupción: acciones para incrementar la resiliencia de niñas y jóvenes habitantes de zonas expuestas a peligros volcánicos en la región de la Araucanía

María Angélica Contreras Vargas¹⁻², Sofía Vargas Payera⁴⁻⁵⁻⁶, Carolina Geoffroy³, Gabriela Pedreros Delgado¹, Teresa Venegas⁷, Gabriela Tascón Fuenzalida²

- (1) Servicio Nacional de Geología y Minería
(2) Geoparque mundial UNESCO Kütarkura
(3) Xterrae Geología
(4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes
(5) Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile
(6) Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
(7) Liceo Bicentenario Polivalente

Diversos estudios evidencian una vulnerabilidad superior de niñas y mujeres ante peligros geológicos. Esto no se relaciona a aspectos biológicos o fisiológicos, sino que existe una componente social que determina el nivel de afectación entre las que se cuentan: normas sociales, roles de género y diferencias socioeconómicas (Neumayer and Plümper, 2007). En directa relación, un diagnóstico conocido y documentado corresponde a la brecha de género existente en áreas STEM en detrimento de las niñas y mujeres (Alessandro and Estebanez, 2022; Alessandro and Estebanez, 2022). Esta persiste a lo largo de toda la trayectoria formativa escolar de las estudiantes y a medida que esta avanza solo se incrementa y perpetúa incluso hasta la etapa profesional.

Exponer a las niñas a ambientes solidarios y oportunidades de aprendizajes del mundo real tales como campamentos y trabajo en terreno, puede incrementar su interés y eficacia personal en disciplinas STEM (UNESCO, 2019). Por otra parte, la presencia de mentoras parece ser especialmente beneficioso pues fomenta su confianza y mejora su comprensión de las carreras relacionadas. Un ejemplo exitoso de proyecto de este tipo corresponde al proyecto “GeoGirls”, organizado por U.S. Geological Survey – Cascades Volcano Observatory y el Mount St. Helens Institute en donde mujeres científicas junto a un grupo de estudiantes realizan trabajo de campo en el volcán Santa con el fin de incrementar la confianza de las participantes en el área científica.

En Chile, existen 92 volcanes considerados activos. Han ocurrido cerca de 212 erupciones en el último siglo que han provocado fatalidades, afectación de la flora y fauna y perturbación de la estructura social de las localidades expuestas. En una región donde sus habitantes se encuentran altamente expuestos a procesos volcánicos, es necesario ejecutar acciones preventivas que lleven a la reducción del riesgo de desastre con perspectiva de género. Un mayor conocimiento de los peligros volcánicos contribuye a la disminución de la vulnerabilidad de niñas y jóvenes ante erupciones futuras.

En consecuencia, se elabora y ejecuta el proyecto Ciencia Pública “Siguiendo las huellas de los gigantes de Kütarkura: Guía de exploración volcanológica para niñas y jóvenes”. Su foco territorial es el área que abarca el geoparque mundial UNESCO Kütarkura en la Región de la Araucanía (comunas de Curacautín, Melipeuco, Lonquimay, Vircún, Cunco, Lautaro y Curarrehue). Aquí, hay 6 volcanes considerados activos, 3 de ellos perteneciente al grupo 1 del ranking de volcanes de Chile (Sernageomin, 2020); es decir, con muy alto nivel de peligro y exposición. Por otra parte, según la encuesta CASEN 2020, el 28,3% de la población es rural, un 53,8% de la población son mujeres, un 31,3% de la población es parte de algún pueblo indígena y la tasa de pobreza por ingresos es de un 17,4%, lo cual la convierte en la región más pobre del país.

El presente trabajo aborda uno de los hitos asociados a la ejecución del proyecto el cual corresponde a un campamento de 4 días en los volcanes Llaima y Lonquimay y zonas distales afectadas por procesos volcánicos. El objetivo de esta actividad consiste en testear una guía de exploración volcanológica elaborada por el equipo ejecutor del proyecto y jóvenes habitantes del geoparque, así como generar una instancia de encuentro de saberes locales y científicos, bajo el alero de mentoras. Quienes participan son científicas sociales, vulcanólogas del mundo público y académico, artistas, 35 jóvenes estudiantes de liceos públicos pertenecientes a las comunas del geoparque, mujeres docentes y habitantes del territorio que han vivenciado erupciones volcánicas y/o poseen un conocimiento ancestral desde la perspectiva de la cosmovisión mapuche. En un diagnóstico pre-terreno, las estudiantes manifiestan sentirse poco preparadas en caso de gatillarse una erupción volcánica, pese a vivir cerca de volcanes activos/o con un registro reciente de erupciones.

Dentro de las actividades a desarrollarse se encuentran: trabajo de campo en zonas afectadas por las erupciones de 2008 y 1957 (volcán Llaima) y 1988 (volcán Lonquimay), conversatorios, ejercicio de monitoreo volcánico y trabajo con mapas de peligro volcánico vigentes, actividades científico-artísticas, entre otros.

Acciones concretas que apunten a formar una población menos vulnerable ante futuras erupciones volcánicas involucra llevar a cabo acciones con perspectiva de género, que se desarrollen desde el territorio, e involucren tanto en su creación como ejecución a sus habitantes en un rol protagonista. Proyectos con tales características ayudan a la formación de líderes comunitarias, figuras claves para la gestión del riesgo una vez gatillada una erupción volcánica.

Palabras Clave: brecha de género, disciplinas STEM, volcanes activos, resiliencia.

Financiamiento: Financiado por el programa Ciencia Pública 2023 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Agradecimientos: Servicio Nacional de Geología y Minería, Xterrae, Sociedad Geológica de Chile, Universidad Católica de Temuco.

Referencias:

- Mujeres En Stem En Lac., 44. Available at: <http://forocilac.org/wp-content/uploads/2022/02/PolicyPapers-CILAC-Gender-ESP.pdf>.
- Neumayer E. and Plümper T. (2007) The gendered nature of natural disasters: The impact of catastrophic events on the gender gap in life Expectancy, 1981-2002. Ann. Assoc. Am. Geogr. 97, 551–566.
- UNESCO (2019) Descifrar el código: La educación de las niñas y las mujeres en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Available at: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366649?posInSet=1&queryId=d5f381da-86f6-442b-8f3b-a86a83220043>.

La importancia de los referentes femeninos en las geociencias

Camila Loaiza¹, Valentina Villanueva¹, Deborah Cáceres¹, Débora Morales¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Históricamente las geociencias han sido dominadas por hombres, si bien la participación femenina en esta área ha aumentado en las últimas décadas, siguen existiendo barreras de género, falta de oportunidades de liderazgo y discriminación, lo que dificulta la integración y desarrollo de las mujeres en estas áreas. Es por ello, que la existencia de referentes femeninos en las Ciencias de la Tierra juega un rol primordial para inspirar y motivar a mujeres y niñas a seguir carreras en este campo.

A medida que avanzamos en la formación académica como profesionales de las Ciencias de la Tierra, muchas de las decisiones y caminos forjados se ven influenciados por situaciones que nos inclinan a proseguir o desistir el rumbo. Los modelos y referentes en esta área, pueden motivarnos a tomar importantes decisiones sobre nuestra formación. Como mujeres, buscamos reflejarnos e identificarnos con otras que puedan ser un referente a seguir. Pero no solamente se necesitan grandes referentes, como por ejemplo Marie Tharp, sino también referentes cercanos que puedan motivar y acompañar en el camino propio, como puede ser una profesora e incluso nuestras compañeras.

En el área de las geociencias aproximadamente la mitad de los estudiantes de pregrado son mujeres. Sin embargo, solo el 27% del profesorado son mujeres, lo cual genera que se vean reducidos considerablemente los referentes femeninos en el área. La inclusión de mujeres en las geociencias tiene un impacto positivo en toda la sociedad, ya que en estas áreas se abordan importantes problemáticas mundiales, por lo cual tener mujeres que puedan aportar diferentes perspectivas, enfoques y habilidades, favorece una mayor colaboración y mejores resultados.

Por medio de una consulta, se pretende caracterizar la cantidad de estudiantes que eligen su tema de Memoria/Tesis acorde a si es Profesor o Profesora Guía, y si hay una incidencia clara en la elección del área de desarrollo acorde a referentes. Además, recogiendo distintos testimonios, poder dar una mirada de si existe una influencia a lo largo de la carrera de las distintas referentes mujeres en los distintos niveles. Todo esto, dentro tanto del ámbito de las geociencias de pregrado y postgrado en distintas universidades a lo largo de Chile.

En este sentido, es importante un cambio cultural y de políticas que promuevan la igualdad de oportunidades en equipos de investigación. Todas estas medidas deben ir acompañadas de un esfuerzo colectivo, donde la contribución de cada mujer y hombre ayudará a promover un presente y futuro más inclusivo y equitativo en el campo de las geociencias.

Palabras Clave: referentes femeninos, inclusión, mujeres en geociencias.

Agradecimientos: A nuestra profesora guía Patricia Larrea por ser una fuente de inspiración y un gran apoyo durante el desarrollo de nuestras investigaciones.

Andinas Chile: Red de mujeres geocientíficas chilenas

Francisca Mallea-Lillo¹, Amanda Peña-Echeverría², Gabriela Barraza², Gisella Palma³, Daniela Parra-Encalada⁴, Camila Zúñiga⁵, Paz Muñoz², Vannesa Rosales², Alejandra Cevo², Carolina Monsalve², Javiera Gonzáles-Cariqueo²

(1) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide, Australia

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(3) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Manuel Montt 367, Providencia, Santiago, Chile

(4) University of Queensland, School of Earth and Environmental Sciences, Brisbane, Australia

(5) SQM, Chile

Andinas es una red colaborativa de geocientíficas que busca fortalecer, vincular, promover y visualizar a las mujeres chilenas en las áreas de geología, geofísica, ciencias planetarias y cualquier otra área relacionada a las geociencias. Además, intenciona el aprendizaje mutuo entre diferentes generaciones y rubros, iniciando diálogos entre las geocientistas dedicadas a la academia y las insertas en el mundo laboral. Andinas desea promover el ingreso de jóvenes a carreras científicas, siendo un puente de información y un espacio de comunicación entre mujeres estudiando carreras en el área de geociencias y egresadas, además de estudiantes secundarias que sientan curiosidad por seguir este camino.

Andinas nace como una iniciativa de estudiantes de geología en la Universidad de Chile el año 2020, en primera instancia, con el proyecto "Geólogas en 1 minuto", donde las profesoras y mujeres estudiantes de postgrado del Departamento de Geología, explicaban a qué se dedican en videos de 1 minuto como máximo, que fueron difundidos por redes sociales. Se logró un alcance en las cuentas utilizadas (Centro de Estudiantes y Departamento de Geología) de 31.882 usuarios/as, marcando una clara tendencia en el público al cual se esperaba llegar. A partir de este proyecto, las estudiantes que tomaron esta iniciativa vieron el potencial de la idea y decidieron crear una red más amplia, que incluyera a mujeres geocientistas a lo largo del país, independiente de su casa de estudios, lugar de trabajo u ocupación.

La creación de Andinas como una red de conexión entre mujeres en geociencias no solo ha sido necesaria en cuanto al apoyo y reflexión de las dificultades y desafíos en torno a la equidad de género en la comunidad geocientífica, sino que también ha sido un espacio de visibilización de las variadas labores de muchas mujeres científicas del país. Desde la creación de Andinas, se han realizado diversos proyectos e iniciativas: foros y conversatorios, entrevistas, podcasts, boletines, alianzas con organizaciones, videos y posts en redes sociales, entre otros. Además, desde el año 2023, Andinas está reconocida como Asociación sin fines de lucro con Personalidad Jurídica, abriendo paso a oportunidades para acceder a apoyos gubernamentales en el desarrollo de proyectos. Actualmente la principal red social (@andinaschile) cuenta con 3.230 seguidores aproximadamente, teniendo más de 300 miembros de geocientistas en Chile y el resto del mundo.

Andinas proyecta ser un espacio de constante evolución, apuntando a la equidad de género en geociencias a través de la reflexión y visibilización.

Palabras Clave: Equidad de género, mujeres, red.

Análisis de la participación y representatividad de investigadoras en la academia de las geociencias

Catalina Morales-Yáñez¹, Alejandra Serey Amador², Josefina Carrasco⁵, Camila Arróspide³, Andrea Navarro-Aránguiz⁴

(1) Universidad Católica de la Santísima Concepción, Department of Civil Engineering, Concepción, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Rancagua, Chile

(3) Universidad Católica del Norte, Programa de Doctorado en Ciencias mención Geología, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(4) Universidad de Chile, Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

(5) Universidad de Chile, Programa de riesgo sísmico, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

La participación de las mujeres a nivel mundial en áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) es menor a la de sus pares hombres. Según el reporte de ciencia de la UNESCO (2021), la cantidad de mujeres presentes en áreas STEM disminuye a medida que aumenta su posición en la academia. A escala global y en comparación a los hombres, se estima que el porcentaje de mujeres que obtienen su título de pregrado es de un 53% y su grado de magíster es de un 55%. No obstante, esta cantidad disminuye cuando se analiza la participación de mujeres en programas de doctorado, llegando a representar sólo el 44% del total de doctores graduados en un año. La escasa participación de mujeres en geociencias se agudiza cuando evaluamos la cantidad de investigadoras, siendo solo el 33% del total de investigadores. De acuerdo con el informe de Brechas de Género en Educación Superior 2022, en Chile existe sólo un 33% de investigadoras incluyendo en el análisis a todas las áreas del conocimiento. En particular en Ciencias Naturales e Ingeniería y Ciencias, el porcentaje de investigadoras es aún menor, con de un 27% en áreas de Ciencias Naturales y un 19% en Ingeniería y Ciencia. Ante este panorama nacional, nace la necesidad de analizar la participación y representatividad de las mujeres científicas en la academia de las geociencias.

Este trabajo tiene por objetivos (1) caracterizar la situación actual de las investigadoras en la academia de las geociencias y (2) determinar las barreras y dificultades por las que son sometidas. Estos objetivos fueron alcanzados mediante un estudio cuantitativo y cualitativo que se realizó en cuatro escuelas de geociencias del país con el fin de evaluar la variabilidad de las condiciones que viven y enfrentan las investigadoras a lo largo del país. La metodología aplicada en este trabajo consta de la realización de una encuesta a los distintos académicos/as e investigadores/as que conforman las escuelas estudiadas junto a entrevistas personalizadas a investigadoras. Tomar conciencia de esta realidad permitirá tomar medidas más eficientes y eficaces tanto para la atracción de investigadoras de carrera temprana y científicas con alto potencial, así como para evitar la fuga y/o estancamiento de ellas a causa de las discriminaciones de género. Evitar discriminaciones de género, particularmente en áreas STEM donde la presencia de mujeres es baja, permitirá el desarrollo académico y docente en un ambiente de igualdad y respeto. Esta investigación entrega recomendaciones y sugerencias con base en resultados cuantitativos y cualitativos para que la participación y representatividad de mujeres científicas en la academia de las geociencias sea más efectiva y eficiente.

Palabras Clave: Investigadoras, participación, representatividad, geociencias, Género.

Agradecimientos: CMY agradece el apoyo de ANID/FONDECYT 3220307. AS agradece el apoyo de ANID/FONDECYT 3230676.

Referencias:

- UNESCO (2021). UNESCO SCIENCE REPORT, The race against time for smarter development, Servicio de Información de Educación Superior (2022). Informe Brechas de Género en Educación Superior. Chile.

Andinas al día! Boletín de mujeres en geociencias

Natalia Castillo⁵, **Alexandra Román Fernández**³, Francisca Mallea-Lillo¹, Gisella Palma², Alejandra Cevo⁴, Amanda Peña⁴, Paz Muñoz⁴

(1) University of Adelaide, Earth Sciences, School of Physical Sciences, Adelaide, Australia

(2) Universidad Mayor, Escuela de Geología, Chile.

(3) Departamento en Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Chile

(5) Andinas Chile, Chile

"Andinas al día!" es un boletín virtual creado, diseñado y editado por mujeres geocientíficas pertenecientes a la Red Andinas Chile. Su público objetivo actual es la comunidad geocientífica, independiente de su ocupación, género, o rango etario.

La idea nace como un mecanismo para ir reviviendo diferentes actividades realizadas por Andinas, sobre todo en redes sociales durante el año, con el fin de mantener a las integrantes de la Red Andinas Chile actualizada. En sus primeras versiones, el foco estaba en sintetizar los proyectos y noticias de la Red, además de presentar noticias, mencionar papers en los cuales mujeres chilenas son autoras o coautoras, y publicar oportunidades de trabajos, prácticas, cursos, entre otros. Con el tiempo, el boletín ha evolucionado incluyendo secciones de entrevistas, reportes sobre actividades lideradas por mujeres geocientíficas, y noticias relevantes para la comunidad de mujeres en Geociencias.

Este boletín es construido a partir de la estructura básica de la organización de Andinas, donde existe una comisión liderada por una coordinadora que se encarga de planificar el trabajo colaborativo entre las integrantes. La organización está basada de acuerdo con el tiempo disponible de cada integrante, flexibilizando las metas de corto plazo y fijando metas a mediano y largo plazo.

Andinas al día! se encarga de informar y comunicar a través de un documento dinámico, con links directos para fácil acceso a diferentes RRSS. Se utiliza una paleta de colores consistente definida para todos los proyectos de Andinas, e ilustraciones originales de animales andinos, los cuales entregan cercanía con el público al momento de informar. Se considera que las imágenes tienen un rol fundamental en el mensaje que se busca transmitir a todas las personas que leen este boletín.

El primer boletín fue publicado en junio de 2021, presentando a la red Andinas con sus inicios, proyectos realizados, objetivos, visión como organización social, entre otros. Actualmente, se publican uno o dos números semestrales, cada vez evolucionando su contenido de acuerdo con el contexto actual.

Se considera que el material generado por estos boletines es fundamental para resaltar, divulgar y difundir actividades en geociencias con un enfoque de género.

Palabras Clave: Boletín, Mujeres, Género.

Mujeres históricas en geociencias: Reescribir los libros de historia

Alexandra Katherine Román Fernández¹, Amanda Peña-Echeverría², Francisca Mallea-Lillo³, Daniela Parra⁴

(1) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
 (2) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile
 (3) Earth Sciences, School of Physical Sciences, University of Adelaide, Australia.
 (4) School of Earth and Environmental Sciences, University of Queensland, Australia

La ciencia ha sido tradicionalmente reservada al género masculino, negando la entrada a estos espacios a mujeres en la historia. Si bien las cifras han ido en mejoría, se observa un incremento en la brecha a medida que se avanza en la carrera profesional ¿Por qué? En la educación básica, actualmente, mujeres y hombres tienen un desempeño similar en ciencias, e incluso el rendimiento escolar suele ser consistentemente más alto en niñas que en niños (Jacob, 2002). En la educación superior, la brecha de género en el ingreso a carreras científicas no es alta (Kochen et al., 2001). Particularmente, la carrera de Geología ha tenido mejores cifras que otras carreras STEM y la brecha no es devastadora.

Para el año 2017, el 35% de estudiantes de la Universidad de Chile en la carrera de Geología correspondían a mujeres, llegando el año 2018 a un 70% de los estudiantes matriculados (Tania Villaseñor et al. 2020). Sin embargo, sí existen espacios en las ciencias de la Tierra donde el desafío existe y es urgente abordarlo. Uno de ellos, es la participación de mujeres geocientíficas en el área de la minería, la cual por muchos años estuvo prohibido, tanto por creencia popular como por ley, afortunadamente ésta la ley que prohibía el ingreso a la mina subterránea, fue abolida en 1966 (Ayala, 2012). A nivel mundial, Chile tiene un 7,2% de mujeres en el rubro, México un 13,5%, Colombia, 5% y Perú 2%, por lo tanto, se trata de una participación aún muy inicial en contraste con las cifras que reporta, esta misma fuente, para Australia y Canadá con 15% y 16% respectivamente de acuerdo con el reporte de la Organización Internacional del Trabajo, OIT (2014).

Para el año 2016, las mujeres representaban el 44% de los programas de doctorado. Sin embargo, solo representan el 31% de los académicos de planta en las universidades, 16% de los directores de centros de investigación, y sólo el 3% de las rectorías. Esto da cuenta de que la brecha vertical aumenta a medida que avanza la carrera académica, en estudios de postgrado y en el ámbito laboral al momento de postular a un cargo directivo (Tapia et al., 2018). Las diferentes investigaciones no contemplan los variados impactos que tiene este fenómeno en los procesos de afiliación, ajuste e impulso de mujeres en la industria, ni tampoco los costos económicos, sociales y familiares que implica (y tiene por consecuencia) su menor participación en el rubro (Salinas et al., 2017). La preocupación y el interés por efectuar soluciones efectivas está cada vez más presente en la actualidad y tienen por objetivo romper las brechas existentes en la empleabilidad, el desarrollo y la proyección laboral.

La iniciativa para reescribir los libros de historia de Geociencias nace por la necesidad de visibilizar aquellas científicas que en su época fueron aminoradas teniendo que esconder sus nombres o sufriendo el fenómeno del techo de cristal, enfrentadas al desafío de acceder a puestos de mayor responsabilidad en sus organizaciones laborales (Carrancio, 2018; Sabharwal, 2013; Cuadrado y Morales, 2007), perdiendo valor sus trabajos y hallazgos en la disciplina. A través de publicaciones en la red colaborativa de geocientíficas chilenas "Andinas", se transmite su legado por medio del registro bibliográfico existente y su destacada contribución en el campo de la Geociencias a lo largo de su vida.

Este proyecto advierte desafíos, por lo que requiere transformaciones innovadoras en cuanto a la metodología de obtención de datos, registro bibliográfico y espacios que permitan profundizar en la historia de estas mujeres. Se requiere hacer un levantamiento de mayor relevancia sobre la historia de geocientíficas en Chile, planteando una serie de entrevistas a mujeres y familias de geocientistas fallecidas para recabar la información a través de un estudio descriptivo y una metodología cualitativa, cuya implicancia aborda la percepción de diversas mujeres en geociencias con una perspectiva analítica de género. De esta forma, el proyecto pretende ampliar el registro de los aportes históricos de mujeres geocientíficas en el pasado y en la actualidad, tanto en Chile como en el resto del mundo.

Palabras Clave: Historia, mujeres, equidad de género.

Referencias:

- [1] Ayala, E. (2012). Mujer y minería: situación de la industria chilena.
- [2] Carrancio, C. (2018). El techo de cristal en el sector público: acceso y promoción de las mujeres a los puestos de responsabilidad. *Revista española de sociología*, 27(3), 475-489.
- [3] Berlien, K. et al., (2016). Realidad nacional en formación y promoción de mujeres científicas en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Santiago, Chile: CONICYT.
- [4] Cuadrado, I., & Morales, J. (2007). Algunas claves sobre el techo de cristal en las organizaciones.
- [5] Jacob, B. A. (2002). Where the boys aren't: Non-cognitive skills, returns to school and the gender gap in higher education. *Economics of Education review*, 21(6), 589-598.
- [6] Kochen, S. et al. (2001). La situación de las mujeres en el sector científico-tecnológico en América Latina. Principales indicadores de género. Las mujeres en el sistema de ciencia y tecnología. Estudios de casos. 19-39.
- [7] Tapia et al. (2018). Mujeres en geociencias: el caso de las geólogas en Chile. XV Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile.
- [8] Revista de psicología del trabajo y de las organizaciones, 23 (2), 183-202.
- [9] Sabharwal, M. (2013). From glass ceiling to glass cliff: Women in senior executive service. *Journal of public administration research and theory*, 25 (2), 399-426. doi.
- [10] Salinas, P., & Romaní, G. (2017). Proyección laboral de las estudiantes mujeres en carreras mineras en la educación superior chilena. *Formación universitaria*, 10(3), 31-48.

Realidad de las mujeres en las Geociencias y Ciencias de la Ingeniería en la región de O'Higgins

Alejandra Serey Amador¹, Tania Villaseñor¹, Laura Becerril¹, Carol Moraga¹, Valeria Nuñez¹, Aline Xavier²

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins, 611, Rancagua, Chile

(2) Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Las Sophoras 165, Santiago, Chile

El presente trabajo, financiado por la Dirección de Equidad de Género y Diversidades de la Universidad de O'Higgins (Convocatoria 2022), busca evaluar las principales motivaciones y dificultades de las mujeres para ingresar a carreras de las Ciencias de la Ingeniería, titularse y continuar una carrera académica en la Región de O'Higgins. La Universidad Estatal de O'Higgins es una institución de 7 años que desde sus inicios ha promovido políticas para la equidad de género, sin embargo, estas parecieran ser aún insuficientes o no se le ha dado un seguimiento para ver su verdadero impacto en esta materia.

La diferencia en el número de matrículas de mujeres vs hombres en carreras de Ciencias de la Ingeniería de Universidades chilenas es abismante, a pesar de la no existencia de diferencias inherentes/innatas entre hombres y mujeres que expliquen las brechas en los aprendizajes o trayectorias académicas en las matemáticas (Bakker et al., 2021; Kersey et al., 2019; Lachance & Mazzocco, 2006; Spelke, 2005). Según Ing2030 (2018), el aumento de mujeres en carreras de ingeniería en Chile no ha sido significativo en un lapso de 10 años: 20% el año 2004 y 24% el año 2014. Tanto así que en el año 2019, el 7% de las mujeres que se titularon de pregrado en Chile, lo hicieron en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM), siendo el país con el porcentaje más bajo de los miembros de la OCDE (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2022).

Para llevar a cabo este estudio se han usado metodologías cuantitativas y cualitativas. El estudio cuantitativo se realizó mediante encuestas online mientras que el estudio cualitativo se hizo a través del desarrollo de Focus group. Se analizaron 468 encuestas online a estudiantes de enseñanza media de la Región de O'Higgins, 94 encuestas a estudiantes de las carreras de Ingeniería de la Universidad de O'Higgins y 25 encuestas a académicos(as) e investigadores del Instituto de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad de O'Higgins. Adicionalmente, se analizaron los resultados de 3 focus groups a alumnas de enseñanza media de la comuna de Rancagua y 3 focus groups a alumnas de las carreras de Ingeniería de la Universidad de O'Higgins.

Dentro de los resultados se observa que un 83% de los y las estudiantes de enseñanza media de la Región de O'Higgins considera que tanto hombres como mujeres avanzan con igual rapidez en sus carreras, un 84% de las y los estudiantes de carreras de Ingeniería de la Universidad de O'Higgins considera que mujeres y hombres tienen igualdad de avance en sus carreras, mientras que un 76% de académicos(as) e investigadores(as) estima que los hombres avanzan más rápido en su carrera. Se constató que estudiantes de enseñanza media, estudiantes de las carreras de ingeniería y académicas e investigadoras de la Región de O'Higgins experimentan brechas y barreras, sumado a la falta de confianza en sus capacidades y logros (Síndrome de la Impostora; Paterson & Vincent-Akpu, 2021). Adicionalmente, a pesar de considerar que en la Región de O'Higgins y en la Universidad de O'Higgins se promueve una cultura para la igualdad de género, el grupo en estudio tiene la creencia que las estudiantes y académicas de las Geociencias y Ciencias de la Ingeniería son más propensas a sufrir acoso. Asimismo, las estudiantes y científicas enfrentan importantes dificultades para compatibilizar la vida familiar y laboral.

A través de este estudio buscamos visibilizar las principales dificultades que enfrentan estudiantes e investigadoras de esta área durante el desarrollo de su carrera. Tomar conciencia de la realidad de las mujeres en áreas STEM en la Región de O'Higgins permitirá tomar medidas más eficientes y eficaces tanto para la atracción como para evitar la fuga y/o estancamiento de estudiantes y científicas con alto potencial, permitiendo un acceso más igualitario en carreras STEM y un desarrollo en un espacio seguro y de respeto.

Palabras Clave: STEM, mujeres, Geociencias, Ingeniería, Región de O'Higgins.

Financiamiento: Proyecto financiado por la Dirección de Equidad de Género y Diversidades. Universidad de O'Higgins. Convocatoria 2022.

Agradecimientos: ASA agradece el apoyo de FONDECYT/ANID 3230676.

Referencias:

- Bakker, A., Cai, J., & Zenger, L. (2021). Future themes of mathematics education research: An international survey before and during the pandemic. *Educational Studies in Mathematics*, 107(1), 1-24.
- Ing2030., Ingeniería 2030 (2018). https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S0718-0764201900040020900011&lng=en.
- Kersey, A. J., Wakim, K. M., Li, R., & Cantlon, J. F. (2019). Developing, mature, and unique functions of the child's brain in reading and mathematics. *Developmental cognitive neuroscience*, 39, 100684.
- Lachance, J. A., & Mazzocco, M. M. (2006). A longitudinal analysis of sex differences in math and spatial skills in primary school age children. *Learning and individual differences*, 16(3), 195-216.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2022). II Radiografía de género en ciencia, tecnología, conocimiento e innovación. <https://observa.minciencia.gob.cl/>.
- Paterson, R., Vincent-Akpu, I. F. (2021). Impostor Syndrome with Women in Science. In *Science by Women: Stories From Careers in STEM* (pp. 83-98). Cham: Springer International Publishing.
- Spelke, E. S. (2005). Sex differences in intrinsic aptitude for mathematics and science?: A critical review. *American psychologist*, 60(9), 950.

La influencia de experiencias tempranas y el ambiente universitario en estudiantes de geociencias: el caso de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

Tania Villaseñor¹, Sergio Celis², Juan Pablo Queupil³, Luisa Pinto Lincoñir⁴, Maisa Rojas⁵⁻⁶

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(2) Universidad de Chile, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica Silva Henríquez, Centro de Investigación para la Transformación SocioEducativa, General Jofré 462, Santiago, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(5) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

(6) Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

Este estudio de caso aborda las experiencias de estudiantes universitarias en los programas de geología y geofísica de la Universidad de Chile. Estas carreras forman parte de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) y tienen una proporción relativamente alta de representación femenina en comparación con las otras carreras de ingeniería y ciencias de la FCFM, dominadas por estudiantes varones. Entrevistamos a 12 alumnas de carreras de geociencias de FCFM para comprender (i) las razones por las que eligieron las geociencias como carrera y (ii) sus experiencias en una institución con un fuerte ambiente masculino que pretende aumentar la matriculación de mujeres en sus carreras. Encontramos que la decisión de seguir una carrera en geociencias fue tomada durante la escuela secundaria, y mantuvieron esta decisión durante los primeros años de la universidad, que está fuertemente centrada en las matemáticas y la física, sin cursos relacionados con las geociencias. Durante este primer periodo en la universidad, conocido como el 'plan común', las estudiantes percibieron un entorno hostil debido a las elevadas exigencias académicas y a la discriminación por razón de género. Sus experiencias experimentaron un cambio positivo una vez que empezaron los cursos de geociencias en su quinto o sexto semestre. La proporción relativamente alta de alumnas en las carreras de geociencias de la FCFM creó un entorno positivo en el que las participantes desarrollaron un sentimiento de pertenencia a la comunidad geocientífica. Las estudiantes también sintieron que el movimiento feminista durante el 2018 en Chile influyó positivamente en sus perspectivas sobre su trayectoria en la FCFM y les entregó herramientas para mejorar su experiencia. Estos hallazgos dan luces para el desarrollo de estrategias que aumenten el interés, la participación y la satisfacción temprana de las mujeres en las disciplinas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) en diversos niveles educativos.

Palabras Clave: mujeres, STEM, Geociencias, sesgos de género.

El Rol de las Geociencias en la Extensión de la Plataforma Continental y los Límites Marítimos de Chile

Carla Hervías¹, **Felipe Aron**¹⁻²⁻³⁻⁶, Alejandro Silva¹, Marcela Bilbao¹, Gaspar González¹, Giovanni Menanno¹, Nicolás Pérez-Estay¹⁻⁴, Alejandro Sanhueza¹, Leonardo Toledo¹, Gonzalo Yáñez²⁻⁵

(1) Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), Ministerio de Relaciones Exteriores, Unidad de Asuntos Estratégicos-Plataforma Continental, Santiago, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(3) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Santiago, Chile

(5) Organización de las Naciones Unidas, Comisión de Límites de la Plataforma Continental, New York, NY, USA

(6) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR) es un tratado internacional multilateral que regula, entre muchos otros temas, los aspectos vinculados con los derechos que tienen los Estados sobre los diferentes espacios marítimos que en ella se definen. En su Artículo 76, la CONVEMAR define la Plataforma Continental como un espacio marítimo inserto dentro de la continuación natural submarina del margen continental del territorio terrestre, compuesto por el suelo y subsuelo marino, el cual alberga importantes recursos estratégicos y hábitats vitales para la vida marina. Bajo ciertas condiciones, este espacio se puede extender más allá de las 200 millas náuticas otorgadas por defecto por la CONVEMAR, para lo cual se debe definir la extensión exacta del margen continental y la Plataforma. Debido a esto, el conocimiento científico de vanguardia sobre las características geológicas y geomorfológicas de estos espacios submarinos son cruciales para extender los derechos soberanos del Estado ribereño sobre el suelo y subsuelo marino. El propósito de esta presentación es dar a conocer y resaltar la importancia de las geociencias aplicadas en la extensión del territorio submarino más allá de las 200 millas náuticas, poniendo énfasis en la experiencia chilena.

Chile suscribió el tratado de la CONVEMAR el 10 de diciembre de 1982, el cual fue ratificado el 25 de agosto de 1997 mediante Decreto N° 1393 del Ministerio de Relaciones Exteriores, entrando en vigor en septiembre del mismo año. Desde el año 2008, la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), dependiente del Ministerio de Relaciones Exteriores, a través del Proyecto de Plataforma Continental, ha recopilado los antecedentes científicos y técnicos que sustentan la extensión de la Plataforma Continental según lo exige el Artículo 76 de la CONVEMAR. En particular, esta información abarca diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra tales como geología y geofísica marinas, oceanografía y geodesia. La recolección de antecedentes se compone principalmente de datos de batimetría de alta resolución, sísmica de reflexión, gravimetría, muestreo de rocas del fondo oceánico, imágenes satelitales, entre otros. Esta información representa los principales insumos para efectuar los análisis que dan sustento a las presentaciones de Chile ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de las Naciones Unidas. Esta comisión es el órgano encargado de validar y emitir recomendaciones respecto de los antecedentes presentados por los Estados ribereños en relación a la extensión de su Plataforma Continental.

La estrecha interacción y cooperación entre los organismos del Estado que componen el Comité Nacional de la Plataforma Continental, tales como el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería, la Empresa Nacional del Petróleo, entre otros, en conjunto con diversas instituciones académicas, ha resultado en un significativo desarrollo de las geociencias aplicadas en nuestro país. Esto ha generando además un capital humano capacitado para enfrentar exitosamente el desafío que significa la aplicación del Artículo 76 para el Estado chileno. A la fecha de exposición de esta ponencia, Chile ha presentado dos casos exitosos a la Comisión de Límites y se encuentra desarrollando un tercer caso que se enviará a revisión durante el año 2024. Además de explicar los principales aspectos legales y científicos del Artículo 76, en este trabajo mostraremos detalles de los casos chilenos de extensión de Plataforma y con esto, mostraremos el potencial que tiene el país para expandir su territorio marítimo.

Palabras Claves: Derecho internacional del mar, Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR), Plataforma Continental, Fronteras marítimas.

Primer Voluntariado Científico en Rapa Nui: transferencia de conocimiento entre las geociencias y la comunidad

Gabriela Barraza Cartagena¹, Carolina Gómez-Fontalba¹, Valentina Flores-Aqueveque¹, Laura Becerril Carretero²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de O'Higgins, Departamento de Ingeniería Civil Geológica, Escuela de Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

Rapa Nui (Isla de Pascua) es una isla volcánica ubicada a 2900 km de la costa de Chile central. Es parte de la cadena de islas volcánicas y montes submarinos de Pascua, al igual que Motu Motiro Hiva (Salas y Gómez), producidos por un hotspot cuya ubicación sigue en debate. Su relieve consta de tres volcanes principales que le dieron origen: Poike, Rano Kau y Terevaka, y más de 100 conos monogenéticos que siguen siendo estudiados.

Esta isla es famosa por sus Moai y los numerosos hallazgos arqueológicos asociados a la cultura Rapa Nui, que reconstruyen la historia e identidad del pueblo. Es por eso que la arqueología y la antropología son las ciencias que más han sido desarrolladas. Sin embargo, las investigaciones de carácter geológico son limitadas y se encuentran enfocadas principalmente al estudio de los volcanes, a pesar de la enorme diversidad de aspectos geológicos que pueden ser estudiados en la isla, desde el punto de vista geomorfológico, paleoclimático, hidrogeológico, entre muchos otros.

Por otro lado, en octubre de 2022 un incendio forestal afectó significativamente el humedal situado en el cráter del volcán Rano Raraku, el cual se secó el año 2018 luego de más de una década de disminución del nivel de agua. Esto, además de impactar a la comunidad por el valor histórico y cultural del lugar, produjo pérdidas bióticas, dañando el ecosistema del sector. A raíz de esto y del potencial geológico que posee la isla nació, junto a CONAF Rapa Nui, un Voluntariado Científico cuyo propósito fue realizar un diagnóstico del humedal y evaluar la estabilidad de la ladera suroriental del cráter, donde se encuentra la cantera de los Moai. Lo anterior, con la finalidad de dar a conocer a la comunidad las principales causas de la sequía del humedal e informar medidas de prevención y mitigación ante posibles inestabilidades de la ladera del cráter, siendo entonces la vinculación con la comunidad fundamental, y el objetivo principal de este proyecto.

Así, además de una investigación geológica, se realizaron en terreno actividades de difusión y divulgación científica, que comprendieron charlas y conversatorios con diversas entidades de la isla (Asociación de Guías, Guardaparques, CODEIPA, Mau Henua, comunidad científica de Rapa Nui), exposiciones de pósters, talleres para niños, niñas y jóvenes, programas de radio y entrevistas en televisión, entre otros.

Para esto la metodología desarrollada durante el voluntariado presentó tres etapas fundamentales. 1) Pre-terreno: recopilación bibliográfica de la zona de estudio y preparación de las principales actividades a realizar en terreno. 2) Terreno: toma de datos y recolección de antecedentes en el sitio de estudio, y desarrollo de las actividades con la comunidad. 3) Post-terreno: análisis de datos, conclusiones preliminares y planificación de nuevos estudios en la zona.

En cada una de las actividades desarrolladas, se destaca la alta participación de los habitantes de Rapa Nui y de las diferentes entidades de la isla, lo cual refleja su gran interés en las geociencias y lo importante que es tener una estrecha relación con la comunidad. En este contexto, es fundamental mencionar también, el gran apoyo por parte de CONAF Rapa Nui en la organización y desarrollo de todo el proyecto.

Futuros esfuerzos están enfocados en analizar la variabilidad hidroclimática a partir del registro sedimentario del humedal, los cuales están siendo apoyados por la Subdirección de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en el contexto de dos tesis de pregrado. Además, se realizará un análisis de estabilidad de laderas y caída de roca en diferentes zonas turísticas como tesis de pregrado de Ingeniería Civil Geológica de la Universidad de O'Higgins y, de la Universidad Andrés Bello, sede Viña del Mar, en el contexto de un trabajo de tesis, se estudiará la calidad de aguas tanto en pozos como en humedales de la isla a través de un análisis isotópico de las muestras.

Por último, queda en evidencia que en el trabajo realizado y por realizar destaca la importancia de la vinculación entre la academia y la comunidad, en donde la transferencia del conocimiento entre ambas partes es fundamental para enfrentar problemáticas locales y de contingencia actual.

Palabras Clave: Rapa Nui, Divulgación científica, Difusión científica, Rano Raraku, Comunidad.

Financiamiento: CONAF Rapa Nui y Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Agradecimientos: A los voluntarios y voluntarias; a las organizaciones: CONAF Rapa Nui, Ma'u Henua, Consejo del Mar, CODEIPA, Mesa de Emergencia Rano Raraku, y OPD; al arqueólogo Itaias Hey y Tahira Edmunds.

Diagnóstico del estado de bienes comunes costeros en el centro-sur de Chile ante el cambio climático: información geoespacial para el co-diseño de la gobernanza

Francisco Bastías Mercado¹, Verónica Oliveros¹, Michelle Berndt Barriga¹, Carolina Ramirez Espinaza¹, Javier Sepúlveda Rivera¹, Bárbara Jerez¹, Beatriz Cid¹, Noelia Carrasco¹, Eduardo Letelier³, Julien Vanhulst³, Francisco Ther Ríos², César Pérez², Eduardo Meza³, Diego Oñate¹

(1) Universidad de Concepción, Concepción, Chile

(2) Universidad de Los Lagos, Osorno, Chile

(3) Universidad Católica del Maule, Talca, Chile

En el marco del proyecto Anillos de Ciencia y Tecnología "Laboratorios de co-diseño para el cambio climático: cuidado y gobernanza de bienes comunes costeros en el centro-sur de Chile", se han instalado tres laboratorios de co-diseño en localidades del centro-sur de Chile: Coronel de Maule, Chovellén y Loanco, en la Región del Maule; Lebu, en la Región del Biobío; y San Juan de la Costa, en la Región de Los Lagos. Estos laboratorios son instancias de trabajo periódicas donde participan actores relevantes mediadas por un equipo interdisciplinario, en las que se analiza la vulnerabilidad climática de los territorios debida a la fragilidad de los ecosistemas, experiencias de despojo y sobreexplotación. Como resultado, durante el primer año de aplicación se han definido entramados de bienes comunes que son valorados por las comunidades locales por su importancia económica, socioecológica y patrimonial, incluyendo el agua, el bosque nativo, la vitivinicultura, y bienes comunes de recolección como las nalcas, frutos del bosque, algas y mariscos. Además, se definieron parámetros biofísicos oceanográficos, atmosféricos, hídricos y geológicos, factores que juegan un rol en el estado actual y la evolución que han tenido los bienes comunes durante las últimas décadas.

La pequeña escala del estudio constituye un desafío respecto de la cantidad y calidad de los datos disponibles, que requieren una resolución suficiente para resultar útiles en la toma de decisiones a nivel local. Este problema se abordó en primera instancia mediante la combinación de datos de literatura, monitoreo ambiental, modelos globales y datos aportados por las comunidades mediante entrevistas, líneas de tiempo y cartografías participativas. A través del conocimiento local ha sido posible ubicar geográficamente los bienes comunes y describir su evolución en el tiempo (desde hace al menos 40 años), marcada por un deterioro en la mayoría de ellos, tanto en su calidad como en su cantidad. También, ha sido posible señalar las posibles causas de dicho deterioro que son percibidas por la comunidad, sobre todo aquellas provenientes de la actividad antrópica local —desde prácticas de recolección inadecuadas hasta la actividad industrial forestal o de vitivinicultura intensiva—, aunque también fenómenos de variabilidad climática como la tendencia al aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, y los efectos de la modificación de la morfología costera luego del terremoto Mw 8,8 de 2010.

Las bases de datos disponibles señalan para los últimos años o décadas, un aumento en la temperatura atmosférica y una disminución en las precipitaciones y en los caudales de cursos de agua, lo que afecta la disponibilidad del recurso hídrico —en todas las localidades estudiadas— para las comunidades humanas y para los bienes comunes que dependen de él, situación agravada por una sobreexplotación y una otorgación problemática de derechos de agua, reflejada en los registros oficiales. Las variaciones del uso de suelo tanto en Lebu como en las localidades del Maule muestran un aumento sostenido de plantaciones de monocultivos forestales en detrimento del bosque nativo y humedales. La información oceanográfica —proveniente de modelos globales de baja resolución o de estaciones de monitoreo fuera de las áreas de estudio—, refleja un aumento de las concentraciones de nitratos, fosfatos y sílice, y una disminución del pH oceánico, acompañados de una intensificación de la explotación registrada de los bienes comunes marinos. La alta presencia de cárcavas de gran tamaño da cuenta de la pérdida del suelo en Coronel de Maule. La combinación del conocimiento local con las bases de datos disponibles de parámetros biofísicos pretende identificar cuáles de ellos se vinculan en mayor medida con el estado de los bienes comunes y cuáles son los vacíos de información que constituyen las principales limitantes para la toma de decisiones, conformando los puntos críticos a los que atender en la elaboración de una estrategia de gobernanza.

Palabras Clave: territorios costeros, saberes locales, cambio climático, transdisciplina, bienes comunes.

Storylines for Climate Governance: A Case Study of the Maule 2017 Megafire

Hernán Bobadilla¹, Carolina Alejandra Ramírez Espinaza², Verónica Laura Oliveros Clavijo²

(1) Politecnico di Milano, Departamento de Matemáticas, La Nave, Via Edoardo Bonardi 9, Milano, Italia

(2) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario, Concepción, Chile

1. Introduction: Motivations for a “storyline” approach

Quantitative representations of uncertainties – often referred to as “probabilistic” or “risk-based” approaches – have been traditionally regarded as the benchmark of scientific rigor. Besides their role in scientific research, they have also played a prominent role in decision-making, providing information that enhances control and enables optimization. Nevertheless, the adequacy of quantitative approaches has been forcibly questioned in fields that deal with “deep” uncertainties, most notably in climate studies (Sutton 2019, Herrando-Perez et al. 2019, Stoerk et al. 2018, Kennel et al. 2016, Nuzzo 2014, Knutti et al. 2013, Parker 2010, Stirling 2010, Dessai and Hulme 2004). In contexts of deep uncertainty, quantification is hampered by i) inexorably insufficient or unreliable evidence to be implemented in representations of uncertainties, ii) inherent complexity and variability in the target systems; and iii) conceptual and theoretical ambiguity (or even ignorance), whether in contexts of scientific consensus or dissensus (Hopster 2021, Marchau et al. 2019, Winsberg 2018). In light of this, climate scientists have progressively adopted more qualitative approaches to the representation of uncertainties (e.g., “scenarios” frameworks and associated “narratives” in IPCC AR6, see also O’Neill et al. 2020).

2. Theoretical Framework: What are “storylines” in attribution and detection science?

In the last decade, a qualitative approach to representations of uncertainties has been introduced and developed in the subfield of attribution and detection (A&D) in climate studies, viz., the “storyline” approach (Shepherd et al. 2018, Hannart et al. 2016a, Hannart et al. 2016b, de Bruijn et al. 2016, Shepherd 2016, Hazeleger et al. 2015, Trenberth et al. 2015, Shepherd 2014, Trenberth 2012, Trenberth 2011). Basically, this approach focuses on the description of multiple, plausible, and physically self-consistent pathways of past or future singular, local events, conditional on specific contributing causal factors.

The storyline approach is allegedly better suited than probabilistic approaches to deal with key aspects of deep uncertainties in A&D (Shepherd 2021, Sillmann et al. 2021, Shepherd 2019). As an illustration, consider the implementation of storylines in the study of extreme events attribution, such as heat waves or floods. Probabilistic approaches typically explore the causes of extreme events by aggregating them over inhomogeneous populations, based on subjective and disputable criteria. And the inherent goal of probabilistic approaches is (probabilistic) prediction, i.e., the central research question is “how likely is type E event to occur given these causes?”.

In contrast, storylines adopt a case-study perspective, treating each extreme event as unique, identifying the specific causal factors that *may* have brought it about in a “forensic” fashion (Lloyd & Shepherd 2020). By focusing on singular, local events, storylines provide higher-resolution information that enables preparedness at finer scales of decision-making. Given that the storyline approach is tailor-made for pondering over local knowledge reported in a qualitative manner, it also offers valuable opportunities for civil society to contribute to scientific understanding of uncertainties based on their local experiences. For this reason, a compelling case has been made about storylines being more intuitive representations of uncertainties (as opposed to probabilistic representations). Accordingly, it is reasonable to surmise that storylines may act as a “pidgin language” that enables more efficient and committed actions, including the enhancement of public risk awareness (Shepherd & Sobel 2020, Shepherd et al. 2018). Finally, by focusing on physical plausibilities rather than probabilities, storylines bring unlikely but still plausible high-impact events to the fore, thus complementing the prospects conveyed by more traditional probabilistic predictions (O’Neill et al. 2020, Sillmann et al. 2019). As a result, the IPCC has introduced storylines in its sixth assessment report (AR6) as a “key new topic” (WGI). And, most importantly for the purposes of this paper, the AR6 implements storylines in the assessment of adaptation strategies and climate governance (WGII).

3. Methodologies

3.1. Case study: The Maule 2017 megafire

The methodology of case studies is central to the storyline approach in A&D: A singular extreme event is chosen, and its multiple, plausible, and physically self-consistent causal pathways are explored, either towards the past or towards the future. In this paper, we focus on the Maule 2017 megafire, a collection of hundreds of forest fires in central Chile that burnt over 5000 sq. km in a timespan of less than two months. We chose this event as a case study given its implications for climate governance: Forest fires are increasingly recognized as a kind of extreme event that is exacerbated by anthropogenic climate change. Still, forest fires are reliant on a series of non-climatic variables which, compounded with climate variables, may or may not trigger forest fires of certain characteristics. In this sense, governance at the local, regional, and even larger scales, is key to enable mitigation and/or adaptation to this kind of hazard.

The Maule 2017 megafire is also an expedient case study to conduct thanks to the amount of available information, whether academic, governmental, or local. In particular, researchers from dissimilar scientific disciplines have identified various drivers of the megafire (e.g., see Azocar de la Cruz et al. 2022, Gómez-González et al. 2019, Bowman et al. 2019, Gonzalez et al. 2018, McWethy et al. 2018, Urrutia-Jalabert et al. 2018), together with its impacts (see, e.g., Balocchi et al. 2022, Mancilla-Ruiz et al. 2021, Balocchi et al. 2020, White et al. 2020, de la Barrera et al. 2018, Rosales-Rodríguez et al. 2018, Valderrama et al. 2018, Gomez and Hahn 2017). Notably, these studies have focused on finding the “best predictors” of the megafire and characterizing its “actual consequences”. In contrast, a storyline approach to the Maule 2017 megafire assesses a range of plausible drivers, even if counterfactual and low-likelihood, and their multiple causal pathways towards potentially high-impact outcomes.

3.2. Causal networks: Qualitative and quantitative

The causal pathways embedded in storylines have been recently represented as causal networks. Two cases are noteworthy. First, Lloyd and Shepherd (2020) deliver a series of qualitative causal networks to represent multiple plausible causal pathways in which weather and climate factors interact with environmental and ecosystem factors, leading to potential environmental catastrophes. Some of the catastrophes they discuss include the collapse of an Arctic ecosystem, a single-year and a multiyear tree die-off, and – most importantly for the purposes of this paper – a record-breaking wildfire season. Lloyd and Shepherd argue that a storyline approach better accommodates the “forensic” approach to evidence prevalent in ecology, by capturing expert-based rules of thumb or heuristics. In this sense, their causal networks are qualitative representations of storylines, which afford categorical understanding of plausible causal pathways. Lloyd and Shepherd add that these preliminary examples may be pursued in the future to add much more detail than the one provided in their paper.

Second, Kunimitsu et al. (2023) also explore the advantages of representing storylines via causal networks. However, they move beyond qualitative/categorical representations *à la* Lloyd and Shepherd and explicitly add probabilistically quantified counterfactual information to their causal networks. This quantitative information – it must be emphasized – is not used for predictive purposes, as in traditional risk-based approaches. Rather, this information only enables comparative assessments of outcomes assuming hypothetical settings. In more technical terms, Kunimitsu et al. allow for the subjective assignment of Bayesian priors to root nodes in the causal network and establish downward conditional probabilities for non-root nodes. While downward conditional probabilities are informed by expert assessments, priors need not be: They represent user choices informed by value judgements, expectations of the future, or strictly hypothetical assumptions that are differently relevant to distinct stakeholders. The modularity of causal networks enables different stakeholders to explore the consequences of different distributions of priors upon root nodes. Furthermore, the causal networks may be designed focusing on specific chosen drivers (factual or counterfactual), in combination with chosen vulnerabilities, exposures, and policies.

4. Preliminary results

Following Lloyd and Shepherd (2020) and Kunimitsu et al. (2023), we attempt to embed storylines related to the Maule 2017 megafire into causal networks. A prototype of a qualitative causal network *à la* Lloyd and Shepherd has been already achieved (Fig. 1). This prototype is based on a suite of plausible drivers and potential outcomes of forest fires, which have been collected by means of a literature review, field data, and local knowledge (the latter via personal interviews and group workshops with inhabitants of Maule).

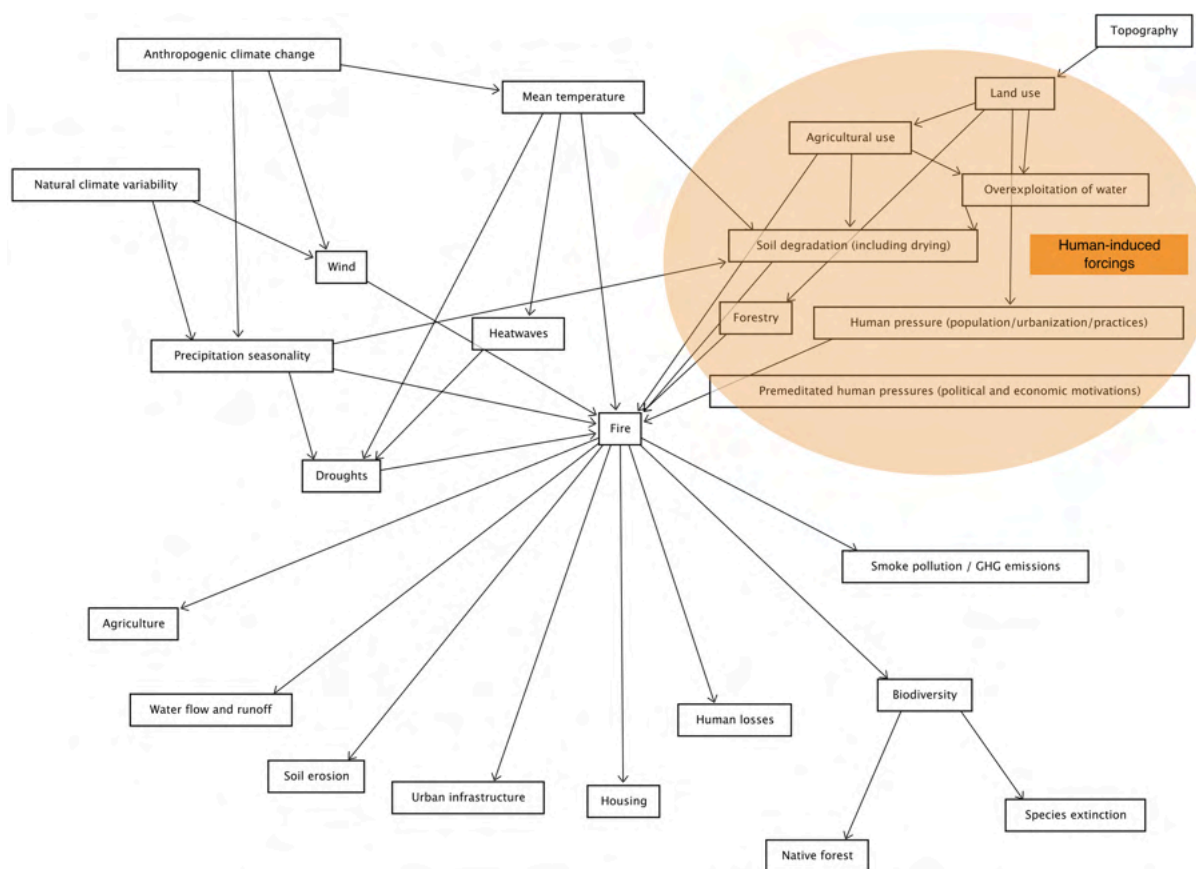


Figure 1: Qualitative causal network representing multiple, plausible, physically self-consistent causal pathways, i.e., storylines.

Plausible drivers that condition the occurrence and nature of the Maule 2017 megafire comprehend (but are not limited to) mean temperature, human pressure (e.g., population density and urbanization), land use (e.g., agriculture and forestry), topography, climate variability (both natural and anthropogenic), soil degradation, among others. Potential high-impact outcomes of the megafire include (but are not limited to) imbalances in hydrological cycle, biodiversity loss, human losses, housing and infrastructure damages, soil erosion, agricultural and forestry losses, air pollution and GHG emissions, among others.

Our next step is to craft a probabilistically quantified causal network, focused on specific drivers, vulnerabilities/exposure, and policies, together with a spectrum of distribution of priors, representative of relevant stakeholders. The choice of specific drivers, vulnerabilities/exposure, and policies will be informed by the identified interests of different stakeholders, while downward conditional probabilities will be based on expert judgements.

Keywords: Storylines, Climate Governance, Causal Networks, Deep Uncertainty, Maule 2017 Megafire.

Financing: The authors would like to acknowledge funding support from ACT 210037 "Codesign Labs for climate change: commons governance and care in coastal areas in south-central Chile" and SURCA "Understanding Under Uncertainty: Symbiotic Relations Between the Storyline Approach and the Philosophy of Scientific Understanding" (PNRR, Italy).

Propuesta de Vínculo Comunitario Hidrosocial para la Construcción de Confianzas con Pueblos Originarios y Comunidades afectadas por la Minería en Chile

Mariana Cervetto¹

(1) HGA SpA, Santiago, Chile

Pueblos Originarios y comunidades del norte de Chile perciben la minería como una actividad extractivista que genera impactos ambientales y sociales negativos e irreversibles, lo que genera tensión en un escenario de escasez hídrica, cambio climático, sobreexplotación, desconfianzas instaladas, conflictos socio-ambientales e incertidumbre acerca de los impactos de la minería en el territorio.

El término hidrosocial se refiere a la interacción compleja entre los aspectos hídricos y sociales en la gestión y uso del agua. Reconoce que el agua no solo es un recurso físico, sino también un elemento crucial en las relaciones culturales, sociales, políticas y económicas. Examina cómo las políticas y decisiones relacionadas con el agua afectan a diferentes grupos sociales, especialmente aquellos en situación de vulnerabilidad, donde se reflejan las desigualdades sociales.

Se propone una metodología de vínculo con Pueblos Originarios y la comunidad donde se sitúa al agua y medioambiente como ejes centrales para generar conversaciones y espacios de encuentro que tienen como objetivo implementar soluciones concretas de corto plazo, orientadas a aportar a la gestión y planificación comunitaria para dar garantías de disponibilidad y calidad del agua, y conservación del entorno natural. Esta se sustenta en los principios de la socio-hidrología/hidrogeología que se han adaptado para integrar la sabiduría ancestral, experiencias y vivencias con las ciencias hidrológicas e hidrogeológicas, y de manera conjunta comprender el funcionamiento de los sistemas hídricos para una la gestión comunitaria adecuada. Analiza cómo las decisiones y soluciones humanas, tales como la extracción de agua, implementación de políticas de gestión y planificación del uso de la tierra y agua, y otras pueden afectar los sistemas de agua e impactar las actividades culturales y económicas de las comunidades.

Se construye a partir de Encuentros de Saberes y Mesas de Agua orientadas a la reflexión y discusión de miembros de la comunidad para conocer el territorio, reconstruir el pasado del funcionamiento hídrico para comprender el presente, realizar un diagnóstico para identificar las problemáticas actuales y para proponer soluciones que deben ser implementadas de forma colaborativa y en el corto plazo para garantizar la disponibilidad y calidad de agua, y conservación del entorno natural. Las actividades que se realizan buscan generar conocimiento y trabajo a partir de la conciliación de las visiones colectivas para aspectos técnicos, comunitarios y ancestrales, educación ambiental, capacitaciones, espacios de reflexión, instancias de goce en la naturaleza, cartografías socio-ambientales, entrevistas semi-estructuradas, registro audiovisual, entre otras que permitan conseguir levantar la información que va estructurando el proyecto.

Considera levantar una caracterización del entorno hídrico y social, desde una mirada holística que aborda la cuenca como un socio-ecosistema que integra conocimientos técnicos hídricos y socio-culturales que aporta al desarrollo local, estrategias y planes de gobierno y minería y los modelos de ordenamiento y gobernanza.

Palabras Clave: socio-hidrología, socio-hidrogeología, relacionamiento comunitario, conflicto socioambiental.

Agradecimientos: Gracias a Elena, collas y atacameños, y a Carolina Guzmán, Paulo Urrutia, Jasson Tondreau, Paula Frigerio, Alejandro Bordeu, Amanda Peña y Josefa Hojas por los aprendizajes en San Pedro de Atacama.

Proyecto de profesionales en Ciencias de la Tierra en las administraciones municipales, una contribución al desarrollo del territorio: Caso Colombiano

Clemencia Gómez¹

(1) Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Geociencias, Ciencias, Carrera 30 45-03, Bogotá, Colombia

La ubicación geográfica, vulnerabilidad económica de gran parte de la población, falta de enseñanza de Ciencias de la Tierra en los colegios, falta de planeación en el ordenamiento del territorio, extracción ilícita de recursos y falta de políticas públicas ajustadas a la realidad de los territorios son el caldo de cultivo perfecto para lo que se observa día a día en las noticias: pérdidas de vidas y económicas por falta de armonía entre las políticas públicas-el conocimiento - las geoamenazas y el deterioro ambiental en las regiones.

En este escenario se ha propuesto en Colombia una iniciativa legislativa que permita contar con un profesional en ciencias de la Tierra en el territorio que pueda permear el tejido social impactando positivamente en el bienestar de la población. Esta iniciativa ha estado acompañada de proyectos de investigación en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con tesis de grado, práctica académica en un municipio y corto documental, además de más de 50 presentación en eventos nacionales e internacionales de diferente índole, campañas adelantadas por las asociaciones profesionales (Sociedad Colombiana de Geología y Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo), comunicaciones y reuniones con miembros del gobierno y los legisladores, noticias en prensa nacional y local, campañas en redes sociales, entre otros.

La realidad actual nos plantea garantizar la presencia de profesionales en ciencias de la Tierra en los municipios, con el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible y sustentable, por medio de la aplicación de conocimientos técnicos en el ejercicio de veeduría, asesoría y validación de temas relacionados con geoamenazas, prospección e identificación de agua subterránea y de recursos minero-energéticos presentes en el territorio, acompañamiento a la elaboración y revisión de los planes y esquemas de ordenamiento territorial y la apropiación social del conocimiento en ciencias de la Tierra. Estamos ante los retos de cambio climático y sus consecuencias para la sociedad, transición energética, carbono neutralidad y todos ellos tienen en común el conocimiento adquirido por los geólogos en su formación académica.

En este sentido, la iniciativa también busca generar más y mejor conocimiento de los temas relacionados con la geología y su importancia para la sociedad. La falta de conocimiento en ciencias de la Tierra impide una correcta y óptima gestión del territorio; generando como consecuencia la existencia de conflictos en el uso del suelo y subsuelo, la falta de mitigación oportuna de potenciales riesgos en las comunidades, y desconocimiento de potenciales recursos hídricos.

Para garantizar la disponibilidad de recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto de Ley, se requiere dotar al Servicio Geológico Colombiano con presupuesto para el desarrollo del mismo, de manera que sean categorizados los municipios según sus necesidades mediante un diagnóstico que permita identificar qué municipios podrían ser agrupados para brindarles el acompañamiento y cuáles de ellos por sus características necesitarían la presencia de un profesional, amparados en que el artículo 15 (titulado conocimiento y cartografía geológica del subsuelo) de la Ley 2056 de 2020 "por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías", en el establece: "El Servicio Geológico Colombiano podrá brindar apoyo a las actividades de prospección y exploración, geoamenazas, prospección de aguas subterráneas, identificación y planes de ordenamiento territorial en los municipios productores, a partir de la información de la que se disponga como consecuencia del reconocimiento, prospección y exploración del territorio nacional que está a su cargo y conforme al presupuesto que del Sistema General de Regalías le sea asignado para tal fin."

Lamentablemente pese a los esfuerzos, no se ha logrado darle trámite legislativo a la iniciativa y por lo tanto se están buscando alternativas como presentar el proyecto al legislativo con soporte de firmas, y en simultáneo dado que el artículo 203 fue aprobado, buscar las estrategias que permitan que dentro del plan se vinculen los profesionales en el territorio.

De esta manera, construir País implica poner al servicio de la sociedad los conocimientos adquiridos en la Universidad y por ello profesionalizar la toma de decisiones en el territorio con soporte en información técnica puede conducir a avanzar en el camino correcto de desarrollo sostenible.

Palabras Clave: Geología, ordenamiento territorial, desarrollo sostenible.

Integrating Local Knowledge for Fair Climate Change Governance

Chris Hesselbein¹, Hernán Bobadilla², Silvia Peppoloni³, Giuseppe Di Capua³, Federico Lampis⁴

(1) Politecnico di Milano, Department of Management Engineering, Italy

(2) Politecnico di Milano, Department of Mathematics, Italy

(3) National Institute of Geophysics and Volcanology, Italy

(4) Kreab Worldwide, Belgium

The wide-ranging effects of climate change demand great concerted efforts for efficient and fair governance at different scales. In particular, adaptation strategies play a prominent role in governance for climate change at the local, national, and international levels. An illustrative example of the latter is the 'EU Strategy on Adaptation to Climate Change'. The EU strategy has four main objectives: to make adaptation smarter, faster, more systemic, and to step up international actions for climate resilience. All EU member states are obliged to prepare and implement national adaptation strategies and plans in line with the EU-wide strategy (first drafts in June 2023 and final versions in June 2024).

We identify two important problems with the EU Strategy on Adaptation to Climate Change which, we argue, should be managed with the appropriate integration of local knowledge. First, there is a tension between the necessity for fast adaptation and the challenge of implementing systemic changes, which require slower, more deliberative negotiations and debate. This tension is particularly pertinent for the effective integration of local knowledge into adaptation strategies, which has only recently been acknowledged by the latest IPCC reports and EU climate policies. Second, although all EU member states are obliged to prepare and implement national adaptation strategies, the EU-wide guidelines are not legally binding. Hence, the efficient implementation of national strategies will, for the most part, rely on the actionability of the plans. And as previous studies have noted, reliance on local knowledge (in particular, practices and experiences of local communities) strongly improves the prospects of subsequent policies as well as their actionability and success.

This paper brings together research on geological hazards, geoethics, philosophy, sociology, and political science, to identify and assess - from multiple conceptual and methodological perspectives - the existing knowledges and practices that are employed by local communities and stakeholders to adapt to the impact of climate change. More specifically, we explore the impact that the integration of local knowledge in policy making has on epistemic justice. Basically, epistemic justice comprehends a set of principles that ensure fair and equal representation and participation in processes of knowledge production among diverse stakeholders.

The primary aim of this paper is to make a transdisciplinary contribution to policy recommendations that foregrounds the principle of epistemic justice in climate change adaptations at the local level. To substantiate our contribution to this policy recommendation, we design an indicator for the measurement of epistemic justice, specifically for the degree in which locally available knowledge and practices are acknowledged, supported, reinforced, and integrated into local policies (and potentially beyond). Ultimately, this indicator is intended as a starting point for the concretization of EU adaptation strategies into operational programmes and territorial actions. However, we expect this indicator to be a useful tool for adaptation strategies beyond the European context.

Keywords: Climate Change Adaptation, Local knowledge, Epistemic justice, Geoethics, EU Adaptation strategy.

Co-diseño para la gobernanza y cuidado de bienes comunes costeros en centro-sur de Chile ante el cambio climático: un enfoque interdisciplinario de la ciencias naturales y sociales

Bárbara Jerez Henríquez⁴, Verónica Oliveros¹, Beatriz Cid Aguayo², Noelia Carrasco Henríquez³, Francisco Bastías Mercado⁴, Alfonso Henríquez⁵, Javier Sepúlveda Rivera¹, Carolina Ramírez Espinaza¹, Michelle Berndt Barriga¹, Eduardo Letelier Araya⁷, Julien Vanhulst⁶, Francisco Ther Ríos⁸, César Pérez Guarda⁴, Diego Oñate Vargas⁴, Eduardo Meza⁴

- (1) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
- (2) Universidad de Concepción, Departamento Sociología, Facultad de Ciencias Sociales, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
- (3) Universidad de Concepción, Departamento de Historia, Facultad de Humanidades y Arte, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
- (4) Universidad de Concepción, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, ACT210037, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
- (5) Universidad de Concepción, Departamento Historia y Filosofía del Derecho, Facultad de Ciencias Jurídicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile
- (6) Universidad Católica del Maule, Departamento de Ciencias Sociales, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile
- (7) Universidad Católica del Maule, Departamento de Economía y Administración, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile
- (8) Universidad de Los Lagos, Departamento de Ciencias Sociales, Lord Cochrane 1046, Osorno, Chile

Los territorios costeros del centro sur de Chile presentan una alta vulnerabilidad climática causada principalmente por la fragilidad de sus condiciones ecosistémicas, por prácticas de despojos y tragedias que afectan a sus principales comunes. En este contexto existen comunidades que llevan a cabo diversas estrategias de cuidados arraigadas en saberes tradicionales y experiencias colectivas que contribuyen a la resiliencia socioecológica a escala local. El presente trabajo expone un análisis de los comunes priorizados por comunidades costeras frente al cambio climático y sus estrategias de cuidados, entendidas en el marco de los debates en torno a los comunes y la justicia climática como perspectivas interculturales, interseccionales y situadas que consideran la importancia de valorar la participación y acciones específicas de las comunidades climáticamente más afectadas. De ambos enfoques se construye un análisis interdisciplinario del estado actual de los comunes en base a criterios de evaluación comunitaria y parámetros biofísicos de vulnerabilidad climática, se argumenta su interdependencia y complejidad como “entramados de comunes”, se analizan sus principales amenazas, y se exponen las diversas estrategias de cuidados como acciones comunitarias de justicia climática en territorios ecológica y socialmente vulnerables. Este trabajo es resultado de un proceso colectivo y transdisciplinario de investigación colaborativa -que incluyó entrevistas, talleres de análisis y cartografía social- en tres territorios del centro sur de Chile durante el año 2022.

Los resultados arrojan que no es posible hablar de bienes comunes aislados sino de entramados heterogéneos de comunes que se extienden desde entramados marinos hasta entramados de la cordillera de la costa, cada uno como un sistema de interrelación socionatural valorado y resignificados por las comunidades por su importancia económica, socioecológica y patrimonial. Estos entramados se encuentran en condiciones de alta vulnerabilidad climática por las condiciones de apropiación, sobreexplotación y degradación lo que se agrava por la diversidad y fricción de sistemas de propiedad y de gobernanzas en que se encuentran. Por su parte, las comunidades cuidan sus comunes a través de diversas estrategias de cuidados, las cuales contribuyen a la co-creación de escenarios de justicia climática, ya que son iniciativas autogestionadas por comunidades climáticamente vulnerables acorde a las condiciones socioecológicas específicas de sus territorios, demostrando ser territorialmente pertinentes para enfrentar el cambio climático incorporando acciones y saberes locales que fortalecen el ejercicio de derechos humanos territoriales. Se concluye planteando la importancia de considerar las condiciones territoriales y los cuidados de los comunes como un campo de respuestas locales, y de oportunidades para fortalecer procesos de gobernanzas plurales en territorios costeros climáticamente vulnerables.

Palabras Clave: Territorios costeros, entramados de comunes, cuidados, saberes locales, cambio climático.

Financiamiento: ANID - ACT210037 "Co-design labs for climate change: governance and care of coastal commons in south-central Chile".

Agradecimientos: Programa Anillos Ciencia y Tecnología, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, Subdirección de Investigación Asociativa.

La incorporación de los conceptos de Geodiversidad y Geoconservación en instrumentos públicos para la Gestión Ambiental Local en Chile

Felipe Alonso Orellana Solar¹, Carlos Rungruangsakorn Leiva², Javiera Saavedra Cancino³, Rodrigo Pérez Garay⁴,
Cristóbal Salazar Pino⁵

(1) Universidad Católica del Maule, Dpto. Química y Biología, Facultad de Ciencias Básicas, San Miguel 3605, Talca, Chile

(2) Universidad Autónoma de Chile, Administración pública, Facultades de Ciencias Sociales y Humanidades, Santiago, Chile

(3) Ilustre Municipalidad de San Clemente, Unidad de Gestión Ambiental, Dirección de Desarrollo Sustentable, Carlos Silva Renard 46, San Clemente, Chile

(4) Fundación Geoparque Pillanmapu, 16 Sur 542, San Andrés, Talca, Chile

(5) Universidad Católica de Temuco, Dpto. Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 2950, Temuco, Chile

La Gestión Ambiental Local (GAL), es un proceso descentralizador fundado en procesos de participación ciudadana, el cual tiene como principal objetivo asegurar la corresponsabilidad en la toma de decisiones ambientales. Considera el fortalecimiento progresivo de la gobernanza ambiental local, mediante la generación de instrumentos de gestión y de conocimientos, para contar con municipios y organizaciones ciudadanas con capacidades técnicas que les faciliten participar efectivamente en la gestión ambiental comunal y abordar los desafíos ambientales desde una perspectiva sistémica e integral, cuya finalidad es el desarrollo sustentable a escala local. Este proceso debe sustentarse en estructuras organizacionales básicas que permitan dar un soporte a la gestión y, a su vez, identificar en qué parte de la organización se conduce el proceso de gestión.

En tanto el Geopatrimonio (o Patrimonio Geológico) se constituye por elementos de la geodiversidad de relevancia y valor especial, los cuales son vestigios clave para reconstruir el pasado, comprender el presente y predecir el futuro, y desempeñan un papel importante en ámbitos científicos, educativos, turísticos y/o culturales. La conexión entre el patrimonio geológico y otros aspectos del patrimonio natural y cultural es esencial para abordar desafíos que permitan aumentar la comprensión de los principales conflictos ambientales que enfrenta la sociedad, como la evaluación y uso sostenible de los recursos, la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción del impacto de los desastres.

Durante los últimos años se han levantado estrategias para la incorporación de conceptos de Geodiversidad y Geoconservación en instrumentos públicos, destacando la Política Ambiental Comunal 2022-2025 de la Ilustre Municipalidad de San Clemente, la cual busca promover la conciencia sobre el patrimonio geológico, posicionar a las comunidades como líderes en geoconservación y educación ambiental, arraigar los sitios de interés geológico como parte de la identidad local, fomentar la investigación científica y académica en la zona, y apoyar la consolidación del proyecto Geoparque Pillanmapu como Geoparque Mundial UNESCO.

Otro de los avances medioambientales que destacan como parte de la institucionalidad ambiental, es el Sistema de Certificación Ambiental Municipal (SCAM) del Ministerio del Medio Ambiente, el cual ha permitido avances en la gestión ambiental local, y gracias a un trabajo reciente, en conjunto con la Universidad Católica del Maule y la Universidad Católica de Temuco, y desarrollado dentro de la Comuna de San Clemente, ha permitido crear las bases para la vocación ambiental en Geodiversidad y Geoconservación, dentro del nivel de Gobernanza Ambiental Climática Comunal, fortaleciendo, así, el desarrollo territorial.

Otra acción relevante, bajo una perspectiva transdisciplinar es la propuesta del Cajón del Río Teno como Santuario de la Naturaleza en la comuna de Romeral, impulsada por el Consejo de Defensa de Los Queñes, trabajada por la Fundación Pillanmapu y apoyada por la SEREMI del Medio Ambiente del Maule y la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Católica del Maule, permite cruzar los elementos de conservación y los patrimonios (natural y cultural) con estrategias de Gobernanza Ciencia-Sociedad, cruzando la caracterización del ecosistema, presencia de flora y fauna nativa en estado de conservación, formaciones geológicas y paleontológicas, con el valor ecológico que dota el área como potencial candidato a Santuario de la Naturaleza.

En consecuencia, la incorporación de conceptos de Geodiversidad y Geoconservación en instrumentos públicos para la gestión ambiental local es esencial para promover la gobernanza ambiental y el desarrollo sustentable a nivel comunal, demostrando la importancia de integrar la geología en la gestión ambiental y resaltar el valor de conservar y proteger el entorno.

Palabras Clave: Geología, Geopatrimonio, Gestión local, Gobernanza ambiental, Santuario de la Naturaleza.

Agradecimientos: Agradecimientos al departamento de Gestión Ambiental Local de la División EDUPAC del Ministerio del Medio Ambiente y Consejo de Defensa de Los Queñes.

Referencias:

- Departamento de Gestión Ambiental Local, División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana, Ministerio del Medio Ambiente. (2020). Manual del Sistema de Certificación Ambiental Municipal. Recuperado de https://educacion.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/01/MANUAL_SCAM_2020-2021.pdf.
- NACIONES UNIDAS. Agenda 21: Programa de Acción para el Desarrollo Sustentable, Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, 3-14 junio, 1992. NACIONES UNIDAS.
- Salazar, C. (2023). Bases para la creación de la vocación ambiental en geodiversidad y geoconservación para el sistema de certificación ambiental municipal; comuna de San Clemente, Región del Maule, Chile [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Temuco].
- Schilling, M., Toro, K., Contreras, P., Levy, C., & Moreno, H. (2012). Geoparque Kütralcura: Patrimonio geológico para el desarrollo sustentable de la Región de la Araucanía. In: Este congreso.
- Servicio de Biodiversidad y Áreas protegidas, Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Guía para la Solicitud de declaración de Santuarios de la Naturaleza. Recuperado de https://areasprotegidas.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/01/Guia_solicitud_Santuarios_de_la_Naturaleza.pdf.
- UNESCO (2017). Los Geoparques Mundiales de la UNESCO: Celebrando el patrimonio de la Tierra, sosteniendo las comunidades locales. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Oficina de París, Francia. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243650_sp.
- Unidad de Gestión Ambiental, Dirección de Desarrollo Sustentable, Ilustre Municipalidad de San Clemente. (2022). Política Ambiental Comunal 2022 – 2025.

Tendencia evolutiva decadal e inundación por estresores naturales en el estuario del Maipo, región de Valparaíso: Incorporación del conocimiento (científico/técnico) en la gestión local del riesgo

Paola Peña¹⁻³, Carolina Martínez²⁻³, Paula Olea⁴

(1) Programa de Magíster en Geografía y Geomática, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(2) Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

(3) Instituto Milenio en Socioecología Costera (SECOS).

(4) Geógrafas Chile

La tendencia evolutiva de los estuarios andinos de Chile central está condicionada por distintos factores de cambio, en especial por su dinámica sedimentaria, la cual ha sido fuertemente afectada durante las últimas décadas por la variabilidad climática, el cambio climático antropogénico y diversos estresores antrópicos en las cuencas hidrográficas. Entre estos destacan una mayor recurrencia de eventos extremos de marejadas, la erosión costera, la disminución de los caudales debido a la mega sequía y efectos de la intervención antrópica en cauces (riego y dragado de sedimentos). En particular, los procesos de oleaje extremo han aumentado en frecuencia e intensidad debido al cambio climático, y sus consecuencias han sido estudiadas más ampliamente en litorales arenosos, pero no así en ambientes de desembocaduras, como estuarios y humedales costeros, donde el conocimiento sobre la variabilidad espacio-temporal es considerablemente menor. Por otro lado, los episodios de cierre de barras en estos estuarios se ha generalizado en Chile central en los últimos años, provocando conflictos socioambientales que requieren conocimiento científico aplicable al manejo integrado de la costa y en particular a la reducción del riesgo de desastre, dado el impacto de potenciales eventos de inundaciones y agravamiento del grado de catástrofe que pueden generar en sistemas estuarinos antropizados o a actividades vinculadas a la pesca artesanal, como es el estuario del río Maipo.

El estuario del Maipo es límite administrativo entre los municipios de San Antonio y Santo Domingo, está expuesto a inundación por eventos de oleaje extremo y crecidas del río. Durante el verano de 2023, la barra del estuario se cerró posterior a un evento de marejada, y se realizaron dos aperturas mecánicas debido al peligro de inundación en la ribera, haciendo necesario avanzar en un protocolo de apertura ecológica. Mientras que, en el invierno del mismo año, fuertes lluvias cordilleranas con isoterma alta, (período de retorno 40 años) ocasionaron una crecida con posible desborde del cauce, lo que provocó la destrucción de la barra, y riesgo de inundación para los habitantes de Lolleo y Lo Gallardo. Ambos eventos evidencian la importancia de una correcta gestión del riesgo de inundación en el estuario (GRD).

La tendencia evolutiva del estuario se analizó mediante cinco cartas geomorfológicas (entre 1945 y 2023), basadas en el modelo de delta en ría (Araya-Vergara 1981). La forma y variación de las espigas litorales son indicadores de la progradación o regresión del sistema.

Se realizó un análisis multitemporal de la barra del estuario (en marea baja) con las imágenes satelitales PlanetScope, mediante una clasificación semi-automatizada, que entrega una zonificación de áreas de arena seca (barra/playa), arena húmeda (intermareal), vegetación en dunas y agua, para 30 fechas entre junio 2021 y junio 2023. Además, se obtuvieron parámetros morfométricos de la boca del estuario y espigas. Por otra parte, se utilizaron las series de tiempo de potencia del oleaje, mareas y caudal para complementar la discusión del comportamiento de las espigas ante estresores naturales.

Se realizaron entrevistas semi-estructuradas a los actores claves vinculados con el estuario, enfocadas en las dos emergencias de este año, experiencias anteriores en otros eventos y en la GRD del estuario. Los relatos recopilados entregaron información relevante de la acción antrópica del cauce que ocurre aguas abajo de la última estación de monitoreo de la DGA, lo que permite el ajuste de la información de caudal y mejora la comprensión de la dinámica de la barra y el estuario en general. Además, las entrevistas permitieron identificar el impacto que han generado estas variaciones en la comunidad y cómo éstas afectan a sus actividades económicas (pesca artesanal y agricultores). Y, por otra parte, en sus implicancias en la gestión local del riesgo.

Por último, se debe destacar que lo que sucede en la parte alta de la cuenca de este río (alta cordillera) pertenece a otra región administrativa, por lo que se necesita una visión de gobernanza multiescalar para la protección del estuario, que considere la cuenca completa del río Maipo y todos sus niveles administrativos (regional, provincial y comunal).

El conocimiento de la geomorfología dinámica del litoral, junto con los saberes locales contribuyen para la toma de decisiones en los nuevos modelos de gobernanza multinivel, ya que permite incorporar nuevo conocimiento, aumenta la transparencia entre actores, eleva la resiliencia social y fortalece la gestión del riesgo local, lo cual implica una mejor toma de decisiones, una planificación más efectiva y una mayor capacidad de respuesta frente a los eventos de inundación del estuario.

Palabras Clave: erosión costera, marejadas, gestión del riesgo de inundación de estuario, Gobernanza multinivel.

Financiamiento: el proyecto ICN2019-015 ICM-ANID, del Instituto Milenio en socio-ecología costera (SECOS).

Referencias:

- Araya-Vergara, J. F. (1981). El concepto de delta en ría y su significado en la evolución litoral (ejemplo en Chile Central). *Informaciones geográficas* Santiago, (28), 71-102.

Gobernanza en el proyecto Geoparque Pillanmapu. Experiencias colaborativas intersectoriales para la gestión integral del patrimonio geológico en base a figuras legales de protección

Rodrigo Pérez Garay¹⁻², Emil Stefani Signorio¹, Felipe Orellana Solar²⁻³

(1) Fundación Geoparque Pillanmapu, 16 Sur 542, San Andrés, Talca, Chile

(2) Sociedad Geológica de Chile, Valentín Letelier 20, Santiago, Chile

(3) Universidad Católica del Maule, Química y Biología, Ciencias Físicas y Matemáticas, Avenida San Miguel 3605, Talca, Chile

El proyecto Geoparque Pillanmapu nace en 2019 con el objetivo de instaurar un modelo de gestión territorial que contribuya al desarrollo sostenible en los Andes del Maule. Con este foco en mente, la iniciativa recogió los aprendizajes sobre el desarrollo del Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura. A partir de aquellas experiencias, los inicios del Pillanmapu se enfocaron en la identificación del tejido social presente en el territorio, así como el fortalecimiento de alianzas estratégicas para abordar uno de los mayores desafíos de los modelos de Geoparques Mundiales de la UNESCO: la gobernanza local.

En 2020, la estrategia de gobernanza empleada en el Geoparque Pillanmapu alcanzó en etapas incipientes un modelo de gobernanza helicoidal de cuatro hélices, integrando el sector público, las organizaciones de la sociedad civil, el sector privado productivo y la Academia, alcanzando diversos grados de consolidación. En cuanto al sector privado productivo, especialmente vinculado al turismo, y a las organizaciones de la sociedad civil, se han desarrollado dos programas: 1) Red de Amigos del Geoparque, enfocada en vincular distintos actores territoriales que operan en líneas estratégicas similares del geoparque en una plataforma común, tal que dinamicen colaboraciones entre actores, tanto privados productivos como organizaciones de la sociedad civil, 2) Embajadores de Cuenca, donde actores relevantes de la sociedad civil pasan a formar parte de la Fundación para generar acción local a nivel de cuenca hidrográfica. En lo que respecta al sector público, el proyecto Geoparque Pillanmapu se ha consagrado entre autoridades comunales y regionales, firmando convenios con diversas instituciones, destacando la Ilustre Municipalidad de San Clemente y la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la región del Maule (CRDP Maule), y adjudicándose un FNDR para el desarrollo del inventario patrimonial y modelo de gobernanza local del geoparque.

La cuarta hélice, correspondiente a la Academia, comienza a consolidarse a nivel regional a partir de la cooperación entre el Geoparque Pillanmapu y la carrera de geología de la Universidad Católica del Maule (UCM), la cual contribuye en 2022 a la gestación del 1° Encuentro de Autoridades del Geoparque Pillanmapu, con la participación de la CRDP Maule, las Secretarías Regionales Ministeriales (SEREMI), Gobierno Regional y alcaldes de las comunas involucradas. La vinculación con la UCM resulta clave, pues constituye la única universidad de la región del Maule que cuenta con la carrera de geología, así como una perspectiva integradora de los nuevos desafíos que enfrenta la geología ante los requerimientos dinámicos de la sociedad. El primer encuentro de autoridades marca un hito en torno a la gestión territorial para la puesta en valor de la geología y la conservación del patrimonio geológico, pues esta actividad fue un catalizador de vinculación entre la UCM y la SEREMI de Medio Ambiente. A través de esta triangulación, sumada al trabajo previo realizado por la organización Consejo de Defensa de los Queñes –miembro de la Red de Amigos del Geoparque–, se consolida en marzo del presente año la hoja de ruta para la declaración del Santuario de la Naturaleza de Los Queñes.

Esta experiencia de santuario, inspirada en el proceso del cajón del río Achibueno, marca un hito a nivel regional en torno a la geoconservación, pues los objetos de conservación definidos se centran en elementos de la geodiversidad y patrimonio geológico, tales como sitios paleontológicos, red hídrica y masas de agua, así como glaciares y otros geositos ubicados en terrenos fiscales. Para su gestión sostenible, la estrategia de continuidad del S.N. propone una gobernanza público-privada, donde el sector público actúa como ente fiscalizador, la Academia y el Geoparque actúan como ente científico para la puesta en valor, mientras que la gestión continua del territorio se encuentra a cargo de una sociedad civil cada vez más empoderada en temáticas de patrimonio, geología, riesgos de desastres y ordenamiento territorial.

A modo de conclusión, la estrategia empleada desde el proyecto Geoparque Pillanmapu en torno a la declaratoria de Santuarios de la Naturaleza, contribuye a dotar a la geodiversidad y patrimonio geológico de los Andes del Maule de una figura de protección legal reconocida por el Estado chileno, a diferencia de la designación de Geoparque Mundial UNESCO, la cual no es vinculante. A su vez, el trabajo multisectorial del proceso fortalece la gobernanza local en la gestión del futuro Santuario de la Naturaleza de Los Queñes, fomentando la conservación efectiva desde un enfoque de abajo hacia arriba promovido desde la red de Geoparques Mundiales de la UNESCO.

Palabras Clave: Geoconservación, Patrimonio Geológico, Gobernanza, Acción ciudadana, Santuario de la Naturaleza.

Financiamiento: Financiado por Fundación Geoparque Pillanmapu.

Agradecimientos: Agradecemos a la carrera de geología de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Católica del Maule, por su continua colaboración en la articulación con distintos actores del sector público.

Campaña "Un(a) Geocientista por Municipio en Chile"

Sofía Pino Mora¹, Felipe Orellana Solar², Nicolás Mendoza Vivallo³, Francisca Maragaño Carmona¹

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Cíviles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 2950, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica del Maule, Departamento Química y Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile

(3) Geoimagen Spa, Palermo PC 8 Lote 2-2, Padre las Casas, Temuco, Chile

La iniciativa de "Un(a) Geocientista por Municipio en Chile", impulsada por la Fundación *Sketch of Geology*, la Asociación Chilena de Ingeniería Geológica y la Sociedad Geológica de Chile, tiene por objetivo visibilizar y expandir las labores realizadas por profesionales de las ciencias de la Tierra (en geología, ingeniería geológica y geofísica), así como la necesidad de evidenciar las experiencias de estos especialistas trabajando en municipios y su impacto en la sociedad. Esta iniciativa se sustenta en profundizar en las medidas que permitan reducir el factor de riesgo, incentivando espacios de trabajo interdisciplinarios en los gobiernos locales, ante los desastres socionaturales, particularmente los de origen geológico y/o hidrometeorológicos latentes en cada territorio del país. Adicionalmente, ello permite fomentar la transferencia de capacidades y proveer de asistencia técnica a través de un enfoque integral de acompañamiento en espacios. Este enfoque inter y transdisciplinario permitiría abordar los desafíos actuales y futuros en áreas como la protección del medio ambiente, la resolución de conflictos en el uso y manejo del suelo, la gestión de recursos no renovables y la exploración y evaluación de aguas subterráneas, adaptándose a las necesidades específicas de cada territorio. A su vez, plantea el inicio de un proyecto a largo plazo que permita proponer cierta normativa que garantice la sostenibilidad de esta figura en los organismos municipales.

Como antecedente, en Colombia se ha socializado y divulgado la iniciativa de la Dra. Clemencia Gómez, geóloga y doctora en Paleontología de la Universidad de Alcalá, cuyo objetivo principal ha sido implementar un geólogo(a) por territorio, para disminuir el desconocimiento de los términos geológicos y aportar en la planificación urbana y la gestión del riesgo, lo que ha permitido implementar estrategias efectivas para mitigar los desastres naturales y promover un desarrollo sostenible.

Chile es un país con una vasta diversidad geográfica y geológica. Existen 346 comunas, administradas por 345 municipalidades, siendo la Antártica la única que carece de una municipalidad propia, dirigida por la Municipalidad de Cabo de Hornos. Sin embargo, sólo un número limitado de comunas ha actualizado sus planes de emergencia e implementado la contratación de geocientistas para labores específicas de la zona, y los organismos especializados como SERNAGEOMIN no cuentan con suficiente personal para gestionar las emergencias de manera adecuada. Para abordar esta situación, se hace necesario establecer una estrategia que involucre una estrecha colaboración entre la academia, los gremios de geología e ingeniería geológica, y los organismos públicos como el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta (SENAPRED), el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu), el Ministerio de Medioambiente (MMA), y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

El desarrollo de esta propuesta es fundamental para abordar los desafíos relacionados con la gestión de los desastres socionaturales, como también los modelos de gestión territorial. La Ley N°21.364 establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) y el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta (SENAPRED), estos organismos tienen como objetivo la elaboración de planes específicos de emergencia para hacer frente a peligros geológicos a nivel nacional, regional, provincial y comunal, lo que subraya la importancia de contar con estos expertos en cada gobierno local. Esta medida fortalecerá la toma de decisiones basadas en evidencia científica y garantizará una gestión efectiva de los recursos naturales, protección de ecosistemas locales, adaptación al cambio climático, y otros elementos clave para la conservación y el desarrollo sostenible. También, la presencia de especialistas de este tipo permitirá potenciar la gestión ambiental a nivel local, desarrollando nuevas metodologías propias de las emergencias latentes de cada territorio. Esto contribuirá a la implementación de medidas más efectivas para la conservación y mitigación del impacto ambiental, y la promoción de la sustentabilidad en cada comuna. Este despliegue también promoverá la educación geológica-ambiental y la concientización de la comunidad ya que, al colaborar estrechamente con las autoridades municipales, podrá promover la participación ciudadana y la sensibilización sobre la importancia de la protección del medio ambiente y la gestión responsable de este.

Palabras Clave: Geociencias, Desastres Socionaturales, Gobiernos Locales, Gestión Territorial, Evaluación Ambiental.

Bases para la creación de la vocación ambiental en Geodiversidad y Geoconservación para el Sistema de Certificación Ambiental Municipal

Cristóbal Salazar Pino¹, Felipe Orellana Solar², Cristian Farías Vega¹, Carlos Rungruangsakorn Leiva³

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Temuco, Chile

(2) Universidad Católica del Maule, Facultad de Ciencias Básicas, Talca, Chile

(3) Universidad Autónoma de Chile, Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades, Santiago, Chile

El Sistema de Certificación Ambiental Municipal (SCAM) del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), creado el año 2009, es reconocido a nivel nacional, como un avance en materia medioambiental para los gobiernos locales. Es un programa integral y voluntario que en los últimos años ha permitido a las municipalidades progresar en la gestión ambiental local, mejorando en aspectos como: la eficiencia en la gestión de recursos, el manejo de residuos sólidos, la protección de la biodiversidad, entre otros, sentando así las bases para la consagración de un modelo de gobernanza ambiental dentro del territorio. El último nivel de certificación del SCAM, denominado nivel de Gobernanza Ambiental-Climática Comunal se compone de vocaciones ambientales, que corresponden al enfoque de trabajo que tendrá la municipalidad durante el desarrollo de este nivel en un plazo de, al menos, 5 años.

Sin embargo, y pese a los esfuerzos del Ministerio del Medio Ambiente y particularmente en su División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana, existen aspectos relevantes que aún no se consideran dentro de este, siendo la geodiversidad y la geoconservación uno de ellos. Una idea errónea sobre la naturaleza, es que las rocas y formas del terreno son sólidas, robustas y abundantes y, por tanto, no necesitan protección, lo cual está muy lejos de ser así. En la actualidad, el patrimonio geológico se encuentra visiblemente amenazado, ya que su deterioro total o parcial es cada vez mayor debido principalmente a las actividades antrópicas.

Es así, que este trabajo busca dar un paso a la inclusión de la geología en la gestión ambiental local, estableciendo las bases para la creación de una vocación ambiental en Geodiversidad y Geoconservación para el nivel de Gobernanza Ambiental-Climática Comunal del Sistema de Certificación Ambiental Municipal.

La metodología utilizada en este trabajo se dividió en 3 etapas principales: i) Revisión bibliográfica de metodologías para el inventario de Geositos; (ii) Aplicación de la metodología de Brilha (2016) para caracterizar y valorar el geosito "Parque Saltos del Maule" identificado por el Proyecto Geoparque Pillanmapu en la comuna de San Clemente en la región del Maule; y (iii) Generación de metas para la vocación en Geodiversidad y Geoconservación en base a las fichas de diagnóstico del Modelo de Madurez para las metas de las vocaciones ambientales ya existentes en el SCAM.

Los resultados obtenidos permitieron generar 6 posibles metas para esta vocación en Geodiversidad y Geoconservación. Estas metas tienen como ejes principales: el inventario de geositos (basado en la metodología de Brilha (2016) probada en un geosito de la comuna de San Clemente), la ciencia, la educación (formal y no formal) y las políticas públicas, y asimismo, permiten que los municipios evalúen su nivel de desarrollo en la vocación en cuestión, a través de la cuál estos puedan incluir a la geoconservación dentro de su gestión territorial y desarrollo local.

La vocación ambiental en Geodiversidad y Geoconservación puede ser implementada en el nivel de Gobernanza Ambiental Climática Comunal del SCAM, dado que, a pesar de que el desarrollo a nivel de geoconservación en Chile no es el más óptimo, si existen las herramientas para que los municipios puedan trabajar esta vocación e incluir a la geoconservación dentro de su gestión territorial y desarrollo local.

Palabras Clave: Sistema de Certificación Ambiental Municipal, Geodiversidad y Geoconservación, Gobernanza Ambiental, Gestión Ambiental Local, Vocación ambiental.

Financiamiento: Este trabajo no cuenta con ningún tipo de financiamiento.

Agradecimientos: Agradecer a la División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana del Ministerio del Medio Ambiente, al equipo del Geoparque Pillanmapu, y a la municipalidad de San Clemente.

Referencias:

- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2), 119-134.
- Crofts, R., Gordon, J. E., Brilha, J. B., Gray, M., Gunn, J., Larwood, J., ... & Worboys, G. L. (2020). Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas.
- Ministerio del Medio Ambiente (2021). Manual del Sistema de Certificación Ambiental Municipal 2020-2021. https://scam.mma.gob.cl/document/MANUAL_DE_INGRESO_SCAM_2021.pdf.

Geología Urbana del Eje Apoquindo-Providencia, Santiago de Chile

Juan A. Arbea¹, María J. Maiza², Delia Rodríguez-Oroz³, Daniel Sellés⁴

(1) Geosalazar, Geología y Paleontología, Clotario Blest 4896, Santiago, Chile

(2) Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Avenida La Plaza 680, Santiago, Chile

(3) ARGEO, Consultoría en geología y turismo para la sociedad, Calle San Miguel 12, Urdaniz-Esteribar, Navarra, España

(4) Independiente, Santiago, Chile

La formación de profesionales y técnicos de la geología requiere la realización de constantes horas prácticas a lo largo de la carrera. Para esto, los centros de estudio realizan talleres de laboratorio y campañas de terreno, estas generalmente en los límites urbanos o fuera de estos, ya que se ha visto dificultado de llevar a cabo *in situ* en torno a los centros urbanos en Chile, sobre todo en Santiago, su capital, debido a la creciente intervención antrópica de áreas naturales no protegidas por ley y el cierre de accesos a afloramientos en terrenos privados. Durante la última década se ha observado un aumento en estas limitaciones, por lo que la docencia ha debido plantear modificaciones en los destinos y métodos de enseñanza tradicionales para lograr un nivel de aprendizaje que cumpla con los estándares educativos. Una alternativa de observación de litologías diversas y con inmejorable exposición lo constituye la “geología urbana”, la visita de fachadas y monumentos dentro de la ciudad.

A finales del Siglo XX, en la construcción de edificios ubicados en el eje Apoquindo - Providencia, las fachadas en las que se emplean rocas ornamentales presentaron un auge, por lo que es común observar una gran variedad litológica al realizar este recorrido como peatón. En este trabajo se presenta un catastro cuyo objetivo es generar una puesta en valor de un laboratorio urbano de geología al aire libre que cumple con presentar una amplia variedad litológica, encontrarse a una corta distancia de los centros de estudio, ser abierto al público y poseer una fácil accesibilidad, prácticamente universal. Para ello se seleccionan 30 fachadas y monumentos de roca a lo largo del eje Apoquindo - Providencia en base a las cuales se proponen dos rutas, denominadas “Minerales” y “Texturas”, cada una de 8 puntos representativos de los diferentes tipos de rocas. Las rutas son diseñadas con criterios de inclusividad y de fácil acceso, por lo que la distancia recorrida es de 1,5 y 2,5 kilómetros respectivamente. Dentro de estos breves recorridos se tiene la oportunidad de observar litologías infrecuentes en el marco geológico chileno, como rocas plutónicas alcalinas, serpentinitas y rocas metamórficas de alto grado. La falta de contexto geológico de la observación de fachadas se ve compensada por el valor didáctico de las grandes superficies pulidas disponibles para la observación de relaciones y texturas minerales que permiten discutir en grupo importantes procesos geológicos. Además, ambas rutas pueden ser utilizadas y modificadas de acuerdo con las exigencias prácticas de distintas asignaturas de Ciencias de la Tierra (Geología General, Mineralogía, Petrología Ígnea y Metamórfica, principalmente). }

Palabras Clave: Geoturismo, Petrología, Educación, Granito, Accesibilidad.

Referencias:

- Carrillo, L. y Gisbert, J. 1993. ¿Pero hay rocas en la calle? Guía de rocas ornamentales de Zaragoza. Ayuntamiento de Zaragoza, Zaragoza, 144 pp.
- Chylińska, D., & Kołodziejczyk, K. 2018. Geotourism in an urban space? Open Geosciences, 10, 297–310.
- Díez-Herrero, A. y Vegas-Salamanca, J. 2011. De roca a roca: Descubre el patrimonio geológico de la ciudad de Segovia. Concejalía de Turismo, Segovia, 95 pp.
- Gonçalves, M. M. 2014. On the trail of the storks. Proposal for a pedestrian circuit in Faro (Algarve, Portugal). In R. Amoêda, S. Lira, & C. Pinheiro (Eds.), HERITAGE 2014 - 4th International Conference of Heritage and Sustainable Development (pp. 1325–1336). Guimarães: Green Lines Institute for Sustainable Development.
- Perez-Monserrat, E., Buergo, M. A. de, Gomez-Heras, M., Muriel, M. J. V., & Gonzalez, R. F. (2013). An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones in Madrid, Spain. Environmental Earth Sciences, 69(4), 1071–1084.
- Rodrigues M. L., Machado C. and Freire E. 2011. Geotourism routes in urban areas: a preliminary approach to the Lisbon geoheritage survey. GeoJournal of tourism and geosites, 2011, 2 (8), 281-294.
- Rosendahl, S. & Gonçalves, M. 2019. When urban geology meets cultural tourism. Journal of Tourism and Heritage Research, 2(4), 238-256.
- Tavallaei, S., Rashidi Ebrahim Hesari, A., Fathi, M.H., Farzaneh, M. and Mousavi S.Ch. 2012. The evaluation of the geo-tourism for urban development: A case study in Ajabshir city, Iran. Journal of civil engineering and urbanism, 2(2), 80-85.
- Winter, J. 2014. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Pearson.

Desarrollo de competencias geocientíficas en carreras STEM: El gap chileno

Ivo Janos Fustos-Toribio¹, Pablo Moreno-Yaeger², Shaun Marcott², Benjamin Edwards³, Bradley Singer², Rachel Breunig², Gonzalo Maragaño Carmona¹⁻⁴, Yasmeen Orellana-Salazar², Matías Romero², Sally Stevens², Daniel Vásquez Antipán¹, Franco Vera⁵, Chelsea Volpano², Eduardo Guerrero⁶, Amy Myrbo⁷

(1) Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar 1145, Temuco, Chile

(2) University of Wisconsin-Madison, Department of Geoscience, 1215 W. Dayton St., Weeks Hall, Madison, USA

(3) Dickinson College, 28 N College St, Carlisle, USA

(4) Universidad de La Frontera, Magister en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Francisco Salazar 1145, Temuco, Chile

(5) Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Subdirección de Geología, Santiago, Chile

(6) Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Portland, USA

(7) Amiable Consulting, Minneapolis, USA

Los profesionales egresados de Ingeniería en Chile se ven enfrentados a la evaluación de amenazas naturales en su desempeño profesional tarde o temprano. A pesar de lo anterior, la formación a nivel de pregrado/postgrado en amenazas naturales sigue siendo deficiente. Lo anterior se debe a numerosos factores dentro de los que destacan la falta de background en geociencias, poco acceso a herramientas para adquirir datos y falta de enfoque multidisciplinario para la toma de decisiones. Esto no permite integrar conocimientos de diferentes áreas, como la geología, la climatología, la hidrología para una correcta evaluación de proyectos de ingeniería. La falta de colaboración e integración entre disciplinas puede limitar la comprensión completa de las amenazas y sus implicaciones.

El presente estudio documenta una experiencia pionera en la Universidad de La Frontera, donde un grupo de estudiantes de diferentes carreras STEM fueron introducidos en el tema de evaluación de amenazas volcánicas mediante un modelo de escuela de verano. La escuela de Verano "Volcano-Ice Summer School" (VISP), enmarcado en el proyecto IF-AMPS (NSF-funded) fue realizada entre el 9 al 13 de enero de 2023, con la asistencia de 21 estudiantes de diferentes carreras STEM.

Los estudiantes participantes tuvieron la oportunidad de adquirir conocimientos en volcanología, identificación de minerales, interacción criosfera-volcanología, permitiendo evaluar el grado de impacto sobre potenciales obras de ingeniería. VISP incluyó clases teóricas a cargo de expertos en volcanología, geoglaciología, monitoreo mediante drones y geofísicos, así como visitas a terreno para realizar observaciones y estudios prácticos en los Andes del Sur. Durante estas salidas de campo, realizadas al volcán Llaima, los estudiantes aplicaron los conceptos aprendidos en el aula, identificando diferentes tipos de rocas y minerales, comprender la importancia de los recursos geológicos y analizar los impactos de los procesos naturales en el medio ambiente.

La participación en VISP permitió a los estudiantes ampliar su comprensión de la interacción entre procesos superficiales y volcánicos, fortaleciendo sus habilidades técnicas y científicas para evaluar amenazas en su futuro profesional. VISP permitió fomentar la interacción entre estudiantes de diferentes disciplinas, estimulando el trabajo en equipo y el intercambio de conocimientos, habilidades críticas no desarrolladas producto de la pandemia COVID19. Concluimos que este tipo de actividades son esenciales para adquirir conocimientos básicos de geociencias, despertando su interés en las geociencias mediante la exploración de nuevas aplicaciones en ingeniería, ciencias aplicadas y la integración de nuevas herramientas tecnológicas en su disciplina. Este tipo de iniciativas contribuyen al desarrollo de futuros profesionales capacitados y conscientes de la importancia de las geociencias en la sociedad actual.

Palabras Clave: STEM, Volcano summer School, Geosciences in engineering.

Financiamiento: FRES.

Agradecimientos: Agradecemos el apoyo del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Frontera. De la misma manera, agradecemos el apoyo de Viviana Letelier para llevar a cabo esta iniciativa.

Estrategia de formación anclada en la investigación en Ciencias de la Tierra: el modelo formativo del Instituto Milenio Ckelar Volcanes

Rodrigo Gonzáles T.¹⁻², Felipe Aguilera¹⁻², Pablo Salazar¹⁻², Verónica Oliveros²⁻³

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

(2) Instituto Milenio en Riesgo Volcánico, Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile

La formación académico-profesional y su vinculación con la investigación científica en universidades de educación superior complejas es siempre un desafío, no siempre resuelto de forma efectiva (Cumming, 2009; Brownlow et al., 2023). Este desafío es a su vez más complejo desde instituciones de educación superior en regiones, donde el crecimiento continuo está condicionado por la disponibilidad limitada de recursos para investigación de alto nivel. En este contexto, el Instituto Milenio Ckelar Volcanes ha implantado un modelo que vincula la formación de pregrado y postgrado en investigación científica. Los diferentes niveles formativos están directamente vinculados a niveles de complejidad de la investigación científica y abarcan desde pregrado hasta los investigadores principales del instituto. Estos niveles tienen sus propias características y objetivos, pero todos están interconectados para formar una trayectoria educativa continua. Los estudiantes de licenciatura y título profesional, el nivel base, han sido incorporados en dos modalidades: como voluntarios, que apoyan las actividades de investigación, o como estudiantes que desarrollan tesis de pregrado con el objetivo de cumplir su actividad de graduación. A su vez, los estudiantes de Magíster desarrollan su tesis sobre temas específicos relacionados con una línea de investigación del instituto. Por su parte, los estudiantes de Doctorado realizan su investigación de Tesis en temas vinculados a una línea de investigación o combinación de dos. Los investigadores postdoctorales investigan en conjunto con los investigadores principales y los estudiantes de doctorado, pero también asesoran y/o co-asesoran a estudiantes de Magíster y/o Licenciatura. En el último nivel, los Investigadores principales dirigen el desarrollo de las líneas de investigación y asesoran a los estudiantes de doctorado, Magíster y pregrado. Ascendiendo en la pirámide de formación, los problemas científicos a abordar son mayores en escala y complejidad. Los estudiantes de licenciatura se dedican a casos de estudio concretos, adquiriendo una comprensión básica de conceptos y fenómenos. Los estudiantes de Magíster se centran en procesos individuales, profundizando en la investigación de casos de estudio concretos. A su vez, los estudiantes de doctorado se enfrentan a retos que requieren procesos integrados para comprender los fenómenos, lo que implica un análisis más profundo y exhaustivo. Las interconexiones entre los niveles de formación son fundamentales para lograr las competencias profesionales, académicas y de investigación declaradas en los currículum de los programas de pre y postgrado involucrados. A lo largo de su formación, los estudiantes también deben adquirir habilidades blandas (no técnicas), que son fundamentales en el entorno profesional, académico y de investigación en el que se desarrollarán. Estas habilidades incluyen el liderazgo, la investigación autónoma, la gestión de equipos, el trabajo de campo y la difusión de resultados en ferias científicas. Estas habilidades se fomentan a través de diversas experiencias, como la participación en proyectos de investigación, la colaboración con investigadores locales y extranjeros en terreno y laboratorio, pasantías de investigación y la presentación de resultados en congresos y simposios, en formato oral y póster. En síntesis, todos los niveles de formación están directamente relacionados con los correspondientes niveles de complejidad de la investigación científica. A su vez, la formación académica y la investigación científica está basada en las líneas de investigación, alimentan la comunicación científica y deben considerar la equidad de género. De esta manera, la formación académica y la investigación científica se vinculan para alcanzar los objetivos del Instituto, de los programas de estudio y, lo más importante, los objetivos de desarrollo de los propios estudiantes.

Palabras Clave: Magíster, Doctorado, Pregrado, modelo formativo, Formación en Investigación.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer al Proyecto ICN2021_038 de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de creación del Instituto Milenio en Riesgo Volcánico, Ckelar Volcanes.

Referencias:

- Brownlow, C., Eacersall, D. C., Martin, N., & Parsons-Smith, R. (2023). The higher degree research student experience in Australian universities: a systematic literature review. *Higher Education Research & Development*, 1-16.
- Cumming, J. (2009). Representing doctoral practice in the laboratory sciences. In *Changing practices of doctoral education* (pp. 125-137). Routledge.

Conectando Generaciones y Explorando la Creatividad: Experiencias Innovadoras en la Enseñanza de Ciencias de la Tierra a través de Juegos y Herramientas Virtuales

Pamela Paz Jara Muñoz¹

(1) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ingeniería

En la enseñanza de las Ciencias de la Tierra, abordar conceptos complejos y desconocidos para la mayoría de los estudiantes puede representar un desafío. Este trabajo presenta una experiencia innovadora en la enseñanza de la geología general y estructural para estudiantes universitarios de 2° año de la carrera de Ingeniería en Minas. Se considera que en estos cursos hay aspectos difíciles de abordar que contienen geometría, formulismo y gran cantidad de contenidos conceptuales, en un contexto de aplicaciones ingenieriles. La propuesta busca superar estos desafíos al utilizar enfoques pedagógicos basados en juegos de mesa, herramientas virtuales como videos cortos y el diseño de aplicaciones para celular. Además, se considera la creciente relevancia de la virtualización en el entorno educativo, especialmente después de la pandemia, ya que los nuevos estudiantes universitarios tienen experiencia previa en entornos virtuales que deben ser integrados de manera efectiva en nuestras metodologías de enseñanza.

En este estudio, se propone una aproximación basada en el diseño o desarrollo de juegos de mesa o virtuales, herramientas virtuales como videos cortos de su propia creación (reels, tik-tok, etc), y diseño de aplicaciones para celular que involucren activamente a los estudiantes de ingeniería en la creación de recursos educativos, para ser evaluados por sus pares, y utilizados por los(as) estudiantes de la generación inmediatamente posterior. De esta forma, se fomenta la colaboración y el trabajo en equipo entre los(as) estudiantes de ingeniería como parte integral de la experiencia. La interacción con sus pares, después de años de trabajo solitario debido a la pandemia, resulta enriquecedora y fortalece su sentido de comunidad académica. Además del componente lúdico inherente al uso de juegos y herramientas virtuales, se utiliza el humor como un recurso adicional para crear un ambiente distendido y entretenido durante la revisión de los videos creados por los(as) estudiantes o al compartir ideas. Estos momentos de distensión contribuyen a generar un ambiente propicio para el aprendizaje y promueven la participación activa. Si bien aún no se ha realizado un estudio cuantitativo para medir la diferencia en el aprendizaje después de esta experiencia, se plantea como una iniciativa positiva que enriquece la experiencia de aprendizaje de los(as) estudiantes y los involucra de manera activa.

En resumen, estas herramientas están diseñadas para abordar los nuevos conceptos promoviendo un aprendizaje activo, coevaluación y conexión entre generaciones; se presentan en este trabajo algunos ejemplos de esta experiencia, la cual busca conectar a las nuevas generaciones con la enseñanza de Ciencias de la Tierra, utilizando juegos y herramientas virtuales como recursos pedagógicos. A través de esta aproximación, se pretende superar los desafíos de comprensión de conceptos complejos, promoviendo un aprendizaje activo y coevaluación, y adaptando las metodologías de enseñanza a la realidad virtual post-pandemia. Esta iniciativa sienta las bases para futuros estudios que evalúen el impacto en el aprendizaje y destacan la importancia de la innovación educativa en la era digital.

Palabras Clave: Metodologías de aprendizaje activo, Juegos y herramientas virtuales, adaptación post-pandemia, experiencia de aprendizaje, Coevaluación y conexión generacional.

Experiencia de enseñanza de herramientas mineralógicas para aplicaciones mineras en contexto Universitario

Pía Lois Morales¹⁻², Sergio Moraga¹⁻², Fernanda Guzmán L³, Nicolás Bravo³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef, 850, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Universidad de Chile, Área para el aprendizaje de Ingeniería y Ciencias (A2IC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, Santiago, Chile

Los minerales que componen las rocas mineralizadas y estériles y las propiedades de estos minerales (resistencia, magnetismo, clivaje, hidrofobicidad, solubilidad) controlan en la eficiencia de los procesos mineros desde procesos de reducción de tamaño, hasta procesos de extracción de metales y recuperación de agua en la minería. Por este motivo, se han desarrollado herramientas de caracterización mineral que permiten capturar información relevante para la operación, tales como ley mineral, especies contenedoras de elementos de interés, liberación, asociaciones minerales, entre otras.

En el contexto de la educación universitaria, el reconocimiento mineral por medio de técnicas como Scanning Electron Microscope (SEM) o por su composición elemental por medio de técnicas analíticas ha estado dirigido a estudiantes de geología. Por otra parte, los contenidos asociados a indicadores de rendimiento de las plantas mineras (KPI) han estado limitados a carreras de ingeniería de minas o metalurgia. Sin embargo, la correcta operación de las plantas de tratamiento mineral y su mejora requiere mirar el problema de una manera más multidisciplinaria, abarcando conocimiento integrado y utilizando las técnicas disponibles hoy en día, que incorporan el reconocimiento del material entrante. En el curso de Química mineralógica (MI-3100) de la Universidad de Chile, se ha desarrollado una metodología de aprendizaje activo, tanto para geólogos como ingenieros, basada en el trabajo con información cuantitativa de minerales y leyes orientada al cálculo de KPI tales como solubilidad, liberación mineral y curva de recuperación estimada a partir de información de química, mineralogía óptica y mineralogía automatizada. En particular, se diseñó y trabajó una actividad con microscopios ópticos equipados con una cámara de 3 Megapíxeles para estudiantes sin experiencia previa en microscopía, con el fin de aumentar sus habilidades técnicas y analíticas para la recolección de datos y ejercitar sus competencias investigativas en mineralogía. La actividad consistió en la observación de minerales de mena a microscopía óptica de luz reflejada, la toma de fotomicrografías representativas, el análisis de las imágenes para el cálculo de liberación y la confección de un pequeño reporte. Esta experiencia se evaluó mediante pautas de cotejo por parte de los docentes el día del laboratorio, el análisis de los reportes entregados y un focus group con una muestra de estudiantes al finalizar el semestre.

Los resultados de la actividad indican que, previa preparación de los estudiantes mediante material complementario, es posible que adquieran un aprendizaje respecto a la operatividad del microscopio óptico, además de la observación de las principales especies minerales y por sobre todo la utilidad de la información recolectada. Además, la experiencia en el laboratorio los hace valorar la experiencia práctica y desarrollar un pensamiento crítico con respecto al proceso de toma de datos. El resultado de la actividad y los aprendizajes adquiridos son satisfactorios, a pesar de que los estudiantes contaban con poca experiencia previa en el área de estudio. Por otra parte, esta actividad, y las otras implementadas en el curso permite valorar la información mineralógica en un contexto aplicado y permite el diálogo de estudiantes (y futuros profesionales) que usualmente pertenecen a distintas áreas productivas en la minería, lo que podría permitir una mejor toma de decisión y optimización de los procesos mineros, por ejemplo, ante la variación del material entrante a la planta que requiera distintas condiciones de tratamiento.

Palabras Clave: mineralogía aplicada, geometalurgia, metodología activa.

Financiamiento: Fondo de Innovación Docente 2023, A2IC, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Agradecimientos: Se agradece la participación de los ayudantes y auxiliares del curso MI3100 - Química Mineralógica Semestre Otoño 2023 Nicolás Rojas, Gabriel Arce, Valeria Moreno, Verónica Moreno y Diego Mora.

Sustentabilidad y valoración ambiental en la formación profesional de la carrera de Geología de la Universidad Católica del Maule

Felipe Alonso Orellana Solar¹, Marta Fuentealba Cruz¹

(1) Universidad Católica del Maule, Química y Biología, Ciencias Básicas, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile

Objetivo

El presente trabajo busca comprender cómo la valoración en torno a la sustentabilidad condiciona los elementos de los ámbitos contextual y personal de la percepción de los estudiantes de la carrera de Geología de la Universidad Católica del Maule (UCM). Las preguntas orientadoras fueron ¿Cuál es la valoración que los estudiantes otorgan a temas ambientales? ¿Existe diferencia en la valoración de los estudiantes entre el ámbito personal y el contextual al interior de las variables actitudinales?

Para llevar a cabo esta investigación, se emplearon tres instrumentos evaluativos: (i) la herramienta de conceptualización breve “*One minute paper: Lexicon*” para evaluar qué términos se asocian al concepto “geología”; (ii) un cuestionario sobre actitudes hacia la geología basado en la escala de actitudes hacia temas ambientales de Moreno et al. (2005) y (iii) la herramienta metacognitiva “*Knowledge and Prior Study Inventory (KPSI)*” para evaluar el grado de comprobación de los conocimientos previos por parte del estudiante. Estos instrumentos fueron aplicados en dos periodos de tiempo, al inicio del semestre y al término del semestre. La muestra estuvo constituida por 57 estudiantes de primer año de la Carrera (entre 18 a 22 años) (33,9% mujeres, el 64,3% hombres y 1,8% no binarios). Además, se utilizó el criterio de inclusión: Tener inscrita la actividad curricular profesional “Introducción a las Ciencias de la Tierra”. Los resultados muestran una adecuada consistencia interna de la Escala de Actitudes Ambientales, con un α Cronbach = 0,798. Además, se determinó que los estudiantes asocian el concepto “geología” principalmente a minerales, volcanes, tierra, rocas y montaña. Al término del primer semestre, se detectó que los estudiantes incorporaron conceptos más especializados a su acervo cognitivo, v.g., placas tectónicas, subducción, riesgos, tipos de rocas (metamórficas, ígneas, sedimentarias). Asimismo, ellos incorporaron conceptos como medio ambiente y riesgos. Por otra parte, el cuestionario sobre actitudes hacia la geología, indicó que las variables del ámbito contextual son aquellas que se deben reforzar. Por lo que se refiere a los resultados del KPSI son positivos en la percepción de aprendizaje, lo que ayuda a identificar las fortalezas y debilidades individuales durante el proceso de aprendizaje. Estos resultados están en consonancia con el proyecto formativo impartido en la Universidad Católica del Maule, el cual promueve la sustentabilidad desde la exploración y evaluación de los recursos naturales como el patrimonio geológico en general, pero también desde las singularidades propias del entorno en pro de un futuro sustentable, donde la integración de conocimientos es clave, de acuerdo a los estándares de responsabilidad social, ética y compromiso con el medioambiente.

Introducción

La Geología es una ciencia de la Tierra que estudia la comprensión y dinámica del planeta. A nivel nacional durante el siglo XX se encontraba asociada, principalmente, a la exploración y evaluación de recursos, destacando los recursos minerales. Durante el siglo XXI y en consonancia con el Cambio Ambiental Global asociado a los impactos irreversibles en el planeta a escala humana durante, al menos los últimos 170 años (IPCC, 2022), emergen áreas de contribución pertinentes a la evaluación de desastres sicionaturales, recursos hídricos, energías renovables no convencionales, como los impactos asociados a la actividad productiva, entendiendo que la riqueza humana se basa en el uso y el consumo de los recursos naturales, y el continuo aumento de este hecho y de los impactos ambientales relacionados a ello pueden tener variados efectos negativos que conduzcan a crisis ecológicas y amenazas a la seguridad. Por ello, el uso y la gestión sustentable de los recursos naturales han cobrado protagonismo y han sido objeto de numerosos debates políticos a lo largo de décadas, iniciado en la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, en Estocolmo en 1972, y que luego fueron reafirmados en Rio+20 o en Estocolmo+50, poniendo en valor la acción local para generar cambios sostenidos y que se ajusten estrategias de gobernanza bajo una mirada sustentable.

La actividad geológica de los Andes del Maule destaca por el registro de eventos volcánicos manifestado en su diversidad geológica, posicionando a sectores como el Paso Pehuenche como un modelo que da cuenta del riesgo de desastres en territorios de montaña. Mientras que, por otra parte, la Geodiversidad converge con otras dimensiones indisolubles para la gestión integrada del territorio, pues sustenta una biodiversidad con altos endemismos y que forma parte de uno de los 35 Hotspot de biodiversidad mundiales, con prioridad de conservación llamado Chilean winter rainfall-Valdivian forests (Andrasanu, 2006; Myers et al., 2000; MMA, 2020) y ha definido el estilo de vida de grupos humanos prehispánicos desde hace 8000 años que han utilizado los recursos geológicos como la obsidiana para la confección de herramientas (Duran et al., 2004).

Adicionalmente en la región se presenta oportunidades de relevancia para quienes conforman el territorio, en consecuencia, la generación de conocimiento bajo un modelo de gobernanza Ciencia-Sociedad en la cual se trabaje de manera coordinada con y la comunidad, permite generar un modelo de gestión territorial desde una perspectiva sustentable que permita incidir en las políticas públicas a nivel local, desarrollando modelos funcionales y replicables a nivel regional y nacional, alineadas con la Agenda 2030. En consecuencia, iniciativas como el Proyecto Geoparque Pillanmapu cobran particular relevancia para consolidar dicho modelo y en donde las universidades son actores clave del proceso.

En consecuencia, la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Católica del Maule asume el compromiso en diseñar el Proyecto Formativo de la carrera de Geología, implementándola desde el año 2021, poniendo por delante la perspectiva sustentable hacia el país y en particular para la región del Maule. Se espera que el estudiante de Geología logre desarrollar aprendizajes a nivel cognitivo, pero también en lo procedimental, actitudinal y social. Por ello, tan relevante como consagrar la formación en conocimientos en ciencias básicas y geociencias, es potenciar la perspectiva sustentable, que le permitan complementar sagazmente equipos interdisciplinarios, ejecutando labores con responsabilidad social, ética y compromiso con el medio ambiente.

Metodología

Se realizó un estudio cuasi-experimental, longitudinal en grupos intactos y todos los participantes componen el mismo curso.

Muestra

La muestra por conveniencia estuvo constituida por 57 estudiantes de primer año de la carrera Geología de la UCM, cuyas edades oscilan entre 18 a 22 años, siendo el 33,9% mujeres, el 64,3% varones y 1,8% no binarios. El criterio de inclusión consistió en: Tener inscrita la actividad curricular profesional "Introducción a las Ciencias de la Tierra".

Instrumentos

One minute paper: Lexicon.

Técnica de conceptualización breve (Maldonado, 2019). Se utilizó en dos momentos, (i) al inicio del semestre y (ii) al finalizar el semestre. Los estudiantes respondieron a la pregunta ¿Qué términos asocias al concepto geología? Los resultados fueron analizados mediante un examen de frecuencia simple o nube de conceptos.

Cuestionario sobre actitudes hacia la geología, basado en la Escala de actitudes hacia temas ambientales de Moreno et al. (2005).

Las respuestas se miden solicitando el grado de acuerdo para cada ítem en un formato tipo Likert de 4 puntos: (1) nada o casi nada, (2) algo, (3) bastante y (4) mucho o totalmente (Ospina *et al.*, 2005). Las variables actitudinales del instrumento son organizadas en dos ámbitos: (1) El ámbito contextual: (1.1) Facilitación de la conducta pro-ambiental: considera aquellas condiciones externas que facilitan, restringen e inhiben una acción pro-ambiental determinada. (1.2) Información: contiene afirmaciones de consenso científico que pretenden medir el conocimiento de un problema ambiental dado, (1.3) Norma social: hace referencia a las reglas percibidas por los individuos de la comunidad y (2) El ámbito personal: (2.1) Obligación moral o norma personal: indica el sentimiento de la obligación para asumir cierta responsabilidad ante los problemas ambientales, (2.2) Valoración: se basa en el juicio que el individuo realiza sobre la seriedad del problema.

Knowledge and Prior Study Inventory (KPSI)

Se diseñó un instrumento autoevaluativo en formato KPSI (Young y Tamir, 1977) que incluyó cinco ítems, y con una escala de cuatro niveles descendentes (1) Se lo podría explicar a mis compañeros, (2) Creo que lo sé, (3) No lo entiendo, (4) No lo sé. Se utilizó en dos momentos, a comienzo de semestre y al finalizar el semestre, con la finalidad que los estudiantes perciban lo que aprendieron en el trayecto de la actividad curricular.

Resultados

One minute paper: Lexicon

A través de la técnica de conceptualización breve, se puede apreciar que inicialmente los estudiantes de primer año de la carrera de Geología de la UCM asocian el concepto "geología" a minerales, volcanes, tierra, rocas, montaña. Luego de finalizado el primer semestre, se observa que los estudiantes incorporan conceptos más especializados a su acervo cognitivo, v.g., placas tectónicas, subducción, riesgos, tipos de rocas (metamórficas, ígneas, sedimentarias) además incorporan el concepto de medio ambiente.

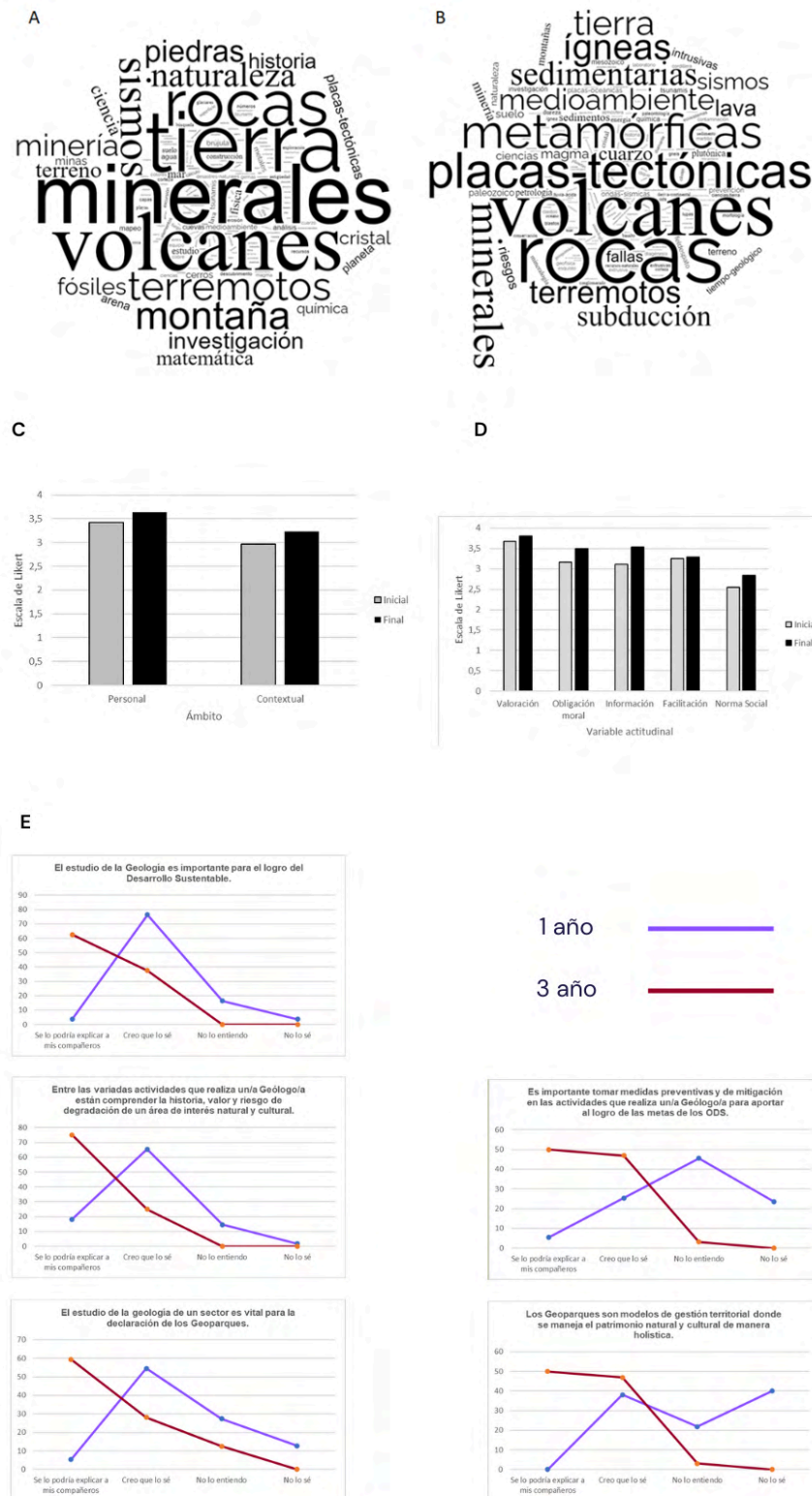
Cuestionario sobre actitudes hacia la geología, basado en la Escala de actitudes hacia temas ambientales de Moreno et al. (2005).

La fiabilidad original de este cuestionario, basado en el coeficiente de alfa de Cronbach, obtenido desde el estudio de Moreno *et al.* (2005), fue de 0,838. En este estudio se realizó una modificación en el número de preguntas y cada una de ellas se relacionó con temáticas geológicas, obteniendo una confiabilidad del cuestionario de 0,798, lo que demuestra alta consistencia interna del instrumento.

Al comparar el grado de valoración de las preguntas del ámbito personal al inicio y término del semestre, detectamos que existe una tendencia al incremento de la valoración desde $3,24 \pm 0,72$ a $3,64 \pm 0,59$, la cual no es significativa ($p > 0,001$). Igual tendencia se observa en el ámbito contextual $2,97 \pm 0,96$ a $3,23 \pm 0,80$ ($p > 0,001$). Por otra parte, Al comparar el grado de acuerdo de las preguntas del ámbito personal con las del ámbito contextual, detectamos que las primeras obtienen una mayor valoración al inicio ($3,24 \pm 0,72$) y al final ($3,64 \pm 0,59$) del semestre, que las del ámbito contextual ($2,97 \pm 0,96$; $3,23 \pm 0,80$ respectivamente); diferencias estadísticamente significativas $p < 0,001$. Lo que demuestra que existe una sensibilidad ecológica subjetiva latente, ya que se detecta una actitud de alta valoración a temáticas ambientales. A diferencia, la menor valoración del ámbito contextual lo que puede ser reflejo de falta de información de esta problemática.

Knowledge and Prior Study Inventory (KPSI)

Los resultados muestran que, al inicio del semestre, el mayor porcentaje de respuesta para las preguntas 1, 2 y 4, correspondió a la categoría 2 (creo que lo sé) y 3 (no lo entiendo); por su parte, para en pregunta 3 que hace alusión a medidas preventivas y de mitigación en las actividades que realiza un Geólogo/a para aportar al logro de las metas de los ODS, el mayor porcentaje de respuesta es para la categoría 3 (no lo entiendo) 45,6%. Asimismo, al preguntar por la funcionalidad de los geoparques el 21,8% de los encuestados responde "no lo entiendo" y el 40% responde "no lo sé".



A) Inicial. B) Final. Lexicon: Frecuencia de los términos que los estudiantes de primer año de la carrera de Geología de la UCM asocian al concepto geología. **C)** Variables actitudinales de los ámbitos personal (valoración, obligación moral) y contextual (información, facilitación, norma social) en estudiantes de primer año de la carrera de Geología de la UCM. **D)** Valoración de las variables actitudinales en estudiantes de primer año de la carrera de Geología de la UCM. **E)** KPSI aplicado. Donde 1 = Se lo podría explicar a mis compañeros, 2 = Creo que lo sé, 3 = No lo entiendo, 4 = No lo sé.

Al término de semestre se observó que, en las cinco preguntas, el porcentaje de respuesta más alto (entre 50,0 a 75,0 %) corresponde a la categoría 1 (se lo podría explicar a mis compañeros), seguido por la categoría 2 (creo que lo sé). Es necesario destacar que ningún participante responde la categoría 4 (no lo sé). Lo que nos lleva a inferir que hubo incorporación de conceptos ambientales en el acervo cognitivo de los estudiantes. Por otra parte, es necesario señalar que las preguntas con mayor puntaje diferencial estaban integradas por contenidos de aporte exclusivo de la asignatura. Los resultados cualitativos son claramente positivos en la percepción de aprendizaje, ayuda a identificar las fortalezas y debilidades individuales durante el proceso de aprender. Por otro lado, invita a los estudiantes a hacer evidente la metacognición, *i.e.* cuestionarse el propio proceso de aprendizaje y lo difícil que son los procesos evaluativos en general. Las autoevaluaciones formativas con enfoque metacognitivo son positivas para el aprendizaje y se recomienda su incorporación en carreras profesionales donde se trabaja con recursos naturales como es el caso de Geología.

Discusión y conclusiones preliminares

La consolidación del proyecto Geoparque Pillanmapu permite desarrollar un modelo de gestión territorial que establece una línea base de acciones, consagrando el desarrollo de un modelo de gobernanza 'Ciencia-Sociedad', que integre a los actores clave tanto del sector público como privado, llegando a tomadores de decisiones a nivel local y regional, fomentando, así, la resiliencia y sustentabilidad en los territorios de Montaña de la región. En ese sentido y sobre a base de los datos expuestos, hacer más sustentable la enseñanza de las Ciencias de la Tierra con el uso del patrimonio geológico en conexión con los demás aspectos del patrimonio natural y cultural es considerado una herramienta fundamental para aumentar la comprensión de los principales conflictos que enfrenta la sociedad, como el aprovechamiento sustentable de los recursos, la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción del impacto de los desastres (UNESCO, 2017).

La complementariedad entre la variedad de elementos geológicos presentes como registro de la evolución de la Tierra, la flora y fauna en el territorio, conforman el Patrimonio Natural de la Región del Maule. El Geopatrimonio se constituye por un conjunto de lugares con elementos geológicos de relevancia y valor especial, los cuales son vestigios clave para reconstruir el pasado, comprender el presente y predecir el futuro (Schilling et al., 2012), reconociendo un importante valor en el ámbito científico, educativo, turístico y/o cultural. Ese cruce en el Patrimonio Natural, de ciencias biológicas y geológicas, se potencia al incorporar una mirada integral y con foco en la innovación, donde exista una coordinación de voces expertas, que sitúen la investigación más allá de la preservación entendiendo que esa diversidad pone al territorio en un escenario altamente vulnerable, considerando su condición multiamenaza, y el grado de exposición de quienes los habitan (sean humanos u otras especies).

Palabras Clave: Geología, Desarrollo Sustentable, Metacognición, Actitud Ambiental.

Agradecimientos: Agradecimientos a la Fundación Pillanmapu, y la Municipalidad de San Clemente.

Referencias:

- Andrasanu, A. (2006). Basic concepts in geoconservation. In Z. Csiki (Ed.), *Mesozoic and Cenozoic Vertebrates and Paleoenvironments – Tributes to the career of Dan Grigorescu*. ED. Ars Docendi, p. 37-41.
- Duran, V., Giesso, M., Glascock, M., Nerme, G., Gil, A., & Sanhueza, L. (2004). Estudio de fuentes de aprovisionamiento y redes de distribución de obsidiana durante el Holoceno Tardío en el sur de Mendoza (Argentina). *Estudios Atacameños* (28), pp. 25-43.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Maldonado, F. A. (2019). Mi participación cuenta: opiniones de estudiantes en formación inicial docente sobre el uso de one minute paper, en *Espacios en Blanco. Revista de Educación*, 30 (1), 81-98. <https://doi.org/10.37177/UNICEN/EB30-265>.
- Moreno, M., Corraliza, J. & Ruiz, J. (2005). Escala de actitudes ambientales hacia problemas específicos. *Psicothema*, 17 (3), 502-508.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Sexto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile*. Santiago, Chile.
- Myers, N., R.A. Mittermeier, C.G. & Mittermeier, G.A.B. da Fonseca and J. Kent. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- Schilling, M., Toro, K., Contreras, P., Levy, C., & Moreno, H. (2012). Geoparque Kütralcura: Patrimonio geológico para el desarrollo sustentable de la Región de la Araucanía. In: Este congreso.
- UNESCO (2017). *Los Geoparques Mundiales de la UNESCO. Celebrando el patrimonio de la Tierra, sosteniendo las comunidades locales*. UNESCO, Oficina de París, Francia. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243650_spa.
- Young, D. B., & Tamir, P. (1977). Finding out what students know. *Sci. Teach*, 6 (44), 27–28.

Gamificación como herramienta en el aprendizaje significativo de los estudiantes en asignaturas de Ciencias de la Tierra

Iván Soto¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

El desarrollo de aprendizajes significativos en estudiantes de programas de Ciencias de la Tierra puede ser fortalecido por diferentes estrategias que mejoren la retención y aplicación de conceptos, herramientas, procedimientos y técnicas necesarias para el desempeño profesional.

Clases presenciales y on-line pueden ser apoyadas por técnicas de participación activas de los estudiantes, aun cuando se estén desarrollando unidades teóricas o de gran complejidad en sesiones de larga extensión (>60 min), en donde los aprendizajes se vean disminuidos por efectos de un gran número de estudiantes o entornos de baja concentración.

Técnicas como el gaming puede ser una alternativa efectiva de ser implementada en cursos masivos utilizando dispositivos de uso común, como teléfonos inteligentes, tablets o computadores (de Soto García, 2018; Hanus, M.D. & Fox, J. 2015) , para lo cual se utilizan cuestionarios basados en preguntas, imágenes o videos en plataformas de acceso gratuito como quizizz.com o kahoot.com por ejemplo.

La competición tiene efectos positivos cuando se persiguen efectos en el aprendizaje además de establecer logros o metas parciales en el desarrollo del cuestionario. Sin embargo, estos aprendizajes deben ser recordados o practicados en sesiones de ayudantías, laboratorios o terreno, para que sean perdurables (Hamari et al. , 2014).

Durante los años 2021, 2022, y 2023 se ha dictado el curso "Orígenes: Historia de la formación de la tierra" el cual está dirigido a estudiantes de las universidades del consorcio G9 (www.redg9.cl). Este curso se dicta de forma online a estudiante de todas las universidades del consorcio que postulen en el sitio www.movilidadg9.cl. Las sesiones sincrónicas con el uso de la gamificación en la plataforma quizizz.com.

Los resultados de esta gamificación varían entre el 55% y el 85% de precisión en las respuestas para el primer semestre de 2023, 53% y 73% para el año 2022 y 57% y 73% para el año 2021. Asimismo este tipo de estrategias han sido valoradas positivamente por más del 95% de los estudiantes encuestados en el periodo 2021 al 2023.

Palabras Clave: Gamificación, Quizizz, On-line.

Referencias:

- de Soto García, I. S. (2018). Herramientas de gamificación para el aprendizaje de ciencias de la tierra. Educe. Revista Electrónica De Tecnología Educativa, (65), 29-39 (393). <https://doi.org/10.21556/edutech.2018.65.1143>.
- Hamari, J., Koivisto, J. & Sarsa, H. (2014). Does gamification work? A literature review of empirical studies on gamification. 7th International Conference on System Science. Hawaii. Recuperado de: https://people.uta.fi/~kljuham/2014-hamari_et_al-does_gamification_work.pdf.
- Hanus, M.D. & Fox, J. (2015). Assessing the effects of gamification in the classroom: A longitudinal study on intrinsic motivation, social comparison, satisfaction, effort, and academic performance. Computers & Education, 80, 152-161. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131514002000>.

“Cuéntame una Geohistoria”, serie animada como herramienta para el entendimiento de las Ciencias de la Tierra

**Pas Toledo Rubilar⁴⁻⁵⁻⁶, Alfredo Antonio Rivas Vergara¹⁻⁶, Catalina Alejandra Cabello Parada¹⁻²⁻⁶,
Isabella Valentina Ciocca Tobar³⁻⁶**

(1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Concepción, Chile

(2) Proyecto Núcleo Milenio El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción, CYCLO, Chile

(3) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre 194, oficina 61, Providencia, Chile

(4) Sociedad Geológica de Chile, Grupo de Educación, Valentín Letelier 20, oficina 401, Santiago, Chile

(5) Instituto para la Resiliencia ante Desastres, La Concepción 191, oficina 601, Providencia, Chile

(6) Revista Ciencias de la Tierra, Chile

Ciencias de la Tierra en la Primera Infancia

La alfabetización de las ciencias de la Tierra puede entenderse como la comprensión del funcionamiento de nuestro planeta, de las causas que pueden generar cambios locales, regionales y globales, asimilar la perspectiva temporal de procesos o fenómenos naturales, y reconocer, entender y valorar las interacciones entre la humanidad y el planeta, por lo que debiese ser un objetivo básico en la educación obligatoria [1]. En Chile, a partir del año 2018, en las Bases Curriculares de la Educación Parvularia se ha planteado como uno de los objetivos generales fomentar el interés, asombro, curiosidad, creatividad, exploración, experimentación y cuidado del entorno natural, permitiendo el desarrollo del pensamiento crítico a temprana edad [2]. En dichas bases, el Ámbito Interacción y Comprensión del Entorno es el campo curricular que articula objetivos de aprendizaje relacionados con la distinción, comprensión y explicación de fenómenos naturales y socionaturales a partir de la curiosidad natural de niños y niñas, con el propósito de tomar conciencia progresivamente de que la existencia y desarrollo de sociedades están inherentemente vinculadas con el entorno natural.

La gran diversidad geológica y geográfica de Chile implica un abanico de interacciones entre nuestra sociedad y la naturaleza. Ante un escenario de cambio climático global y la necesaria adaptación que asegure la vida de las futuras generaciones [4, 5], es fundamental que la comunidad geocientífica, contribuya en la alfabetización en geociencias de los niños y niñas de Chile desde la primera infancia, y por extensión a la comunidad en general, con un enfoque basado en la educación para el desarrollo sostenible [6] y en la gestión del riesgo de desastres [7].

El acercamiento a las geociencias en la primera infancia la consideramos como uno de los primeros cimientos del aprendizaje que permite lograr una visión global e integrada del entorno físico en el que viven y se desarrollan los niños y las niñas [8]. El proceso educativo en manos de las/os educadoras/es del sistema preescolar chileno utiliza actividades que fomentan el interés, asombro, exploración, experimentación y cuidado del entorno natural, permitiendo con ello el desarrollo temprano de competencias del pensamiento crítico [3]. Sin embargo, este proceso no solo ocurre en dichos espacios sino que depende de una amplia comunidad y agentes sociales involucrados. A nivel nacional no existen iniciativas dirigidas a la educación parvularia, teniendo solo como antecedente que en el año 2015 se desarrolló la primera iniciativa a nivel nacional de educación en geociencias a nivel preescolar en Salamanca, Región de Coquimbo, bajo un proyecto de colaboración entre el Grupo de Educación de la Sociedad Geológica de Chile y la Junta Nacional de Jardines Infantiles (JUNJI) [8].

Proyecto Ciencia Pública "Cuéntame una Geohistoria"

En el año 2021 un grupo de profesionales de la geología en conjunto con educadoras de párvulos, ilustradores y animadores, se juntan para crear un proyecto de divulgación geocientífica, titulado "Cuéntame una Geohistoria" la cual consiste es una serie animada, accesible universalmente, de cinco capítulos dirigido a niños y niñas en edad preescolar, con el objetivo de enseñar sobre ciencias de la Tierra desde el Segundo (3 a 4 años) y Tercer Nivel (5 a 6 años) de Educación Parvularia en el sistema escolar nacional.

Este proyecto, postulado y adjudicado en el marco del programa Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (como producto de divulgación para ser ejecutado durante el año 2022), busca sumar esfuerzos para que estas iniciativas educativas puedan seguir desarrollándose y utilizándose en el país, aportando herramientas para la socialización del conocimiento geocientífico tanto dentro, como fuera del aula.

La miniserie animada cuenta la historia de dos hermanos mellizos curicanos, Joaquín y Catalina, y como sus vacaciones recorriendo diversos lugares del país, se ven afectadas por diferentes desastres socionaturales. Las historias se desenvuelven en Chañaral, Limache, Dichato, Villarrica y Puerto Aysén, ciudades que han sido afectadas por fenómenos naturales. En cada historia, los hermanos son acompañados por Gaia, espíritu de la naturaleza, que enseña a los niños por qué y cómo ocurren los fenómenos naturales, como terremotos, maremotos, erupciones volcánicas, aluviones, inundaciones y sequía. Además, Gaia les cuenta sobre los pueblos originarios que habitaron cada zona, entregando conceptos claves en la lengua de los pueblos originarios. El proyecto también incluye una guía de apoyo para adultos según el contenido de cada episodio, para que toda la comunidad escolar se apropie del conocimiento geocientífico y puedan adoptar el rol de agentes socializadores de conocimiento. La guía contiene además una sección de tiempo de experimentos, para que los niños y las niñas aprendan realizando algunas de las actividades que señala la guía y un tiempo de emociones, para que se conecten y aprendan de sus emociones ante los fenómenos de la naturaleza.

A continuación, un resumen de cada capítulo:

Capítulo 1 "Los volcanes en Chile hacen catapún": Joaquín y Catalina disfrutan de sus vacaciones en una cabaña en Pucón, observan la actividad del volcán Villarrica, en eso, aparece y conocen a Gaia, un espíritu de la naturaleza quien los lleva en una aventura en su

su burbuja mágica. En esta aventura aprenderán sobre la estructura general de los volcanes, las erupciones y sus productos, los impactos de las erupciones, y las acciones a tomar durante emergencias volcánicas.

Capítulo 2 "La Tierra que danza bajo nuestros pies": Joaquín y Catalina disfrutan de sus vacaciones en una cabaña en Dichato, cada uno se recrea a su modo, cuando de repente ocurre un sismo, en eso aparece Gaia, quien los lleva en una aventura en su burbuja mágica. En esta aventura aprenderán cómo y por qué se generan los terremotos y tsunamis, y sus impactos; así como de la estructura interna de la Tierra y las placas tectónicas; y sobre la respuesta frente a situaciones de emergencia, el uso de la mochila de emergencia, y las vías de evacuación.

Capítulo 3 "Ay, el cerro se cae": Joaquín y Catalina disfrutan de sus vacaciones en un cerro en Chañaral, cuando de repente ocurre un deslizamiento de rocas, en eso cae Gaia, quien los lleva en una aventura en su burbuja mágica. En esta aventura aprenderán sobre los suelos y cómo se forman, así como sus características generales. También aprenderán sobre los procesos de remoción en masa y cómo se causan, y qué hacer frente a situaciones de emergencia.

Capítulo 4 "Qué secretos oculta el río desbordante": Joaquín y Catalina disfrutan de sus vacaciones a orillas de un río cerca de Puerto Aysén, mientras jugaban de repente el río se desborda obligando a los mellizos a escapar, en eso aparece Gaia y los rescata con su burbuja mágica para llevarlos a una nueva aventura. En esta aventura aprenderán sobre el ciclo del agua, los cambios del estado del agua y su relación con diferentes elementos, como: los glaciares, escorrentías, las nubes, entre otros. Además, aprenderán sobre los depósitos de agua subterránea y su importancia como fuente de agua para los humanos; así como de las inundaciones y sus causas, y el por qué es riesgoso habitar en las riberas de los ríos.

Capítulo 5 "Cambiemos, porque el clima está cambiando": Joaquín y Catalina disfrutan de su último día de vacaciones en el campo de su tío, en Limache. Ellos buscan un riachuelo donde recordaban jugar antes, pero se lo encuentran más seco, en eso, aparece Gaia, quien lo lleva en una aventura en su burbuja mágica. En esta aventura aprenderán sobre la atmósfera, el clima y el tiempo meteorológico, el efecto invernadero, las estaciones, y el cambio climático. Además, aprenderán sobre la sequía y la escasez hídrica, y las acciones que podemos tomar para aportar en la sustentabilidad.

Series animadas como productos de divulgación geocientífica

Se escoge como producto de divulgación una serie animada ya que los materiales audiovisuales son ampliamente utilizados en diversas esferas de la vida de las personas para comunicar todo tipo de contenidos y para una variedad de público, lo cual se ve reflejado en la gran popularidad de plataformas como Youtube, Netflix, Instagram, Tik Tok, entre otras, que incluso cuentan con espacios exclusivos para los más pequeños. Asimismo, en el contexto de la pandemia, los materiales audiovisuales han sido una oportunidad fundamental para la educación a distancia.



Niños de nivel kínder realizando un volcán de greda como parte de las actividades de la guía de apoyo docente realizada a partir del proyecto Ciencia Pública "Cuéntame una Geohistoria". Escuela libre de Gaspi y Susi, comuna de Pirque, Región Metropolitana.

Actualmente, el acceso a la educación y el aprendizaje debe incorporar la diversidad existente en las diferentes comunidades que conforman nuestra sociedad, por lo que este proyecto también busca contribuir en el acceso universal a las geociencias, así como iniciar la inclusión de las lenguas originarias en el proceso de socialización, para ello se incorporará en cada video el lenguaje de señas para personas en situación de discapacidad auditiva, así como subtítulos, además de conceptos geocientíficos en mapudungún cuando sea posible dentro de la narrativa de la serie animada. Esto considerando también una perspectiva de género para contribuir también en la disminución de la brecha de género en la participación de niñas y mujeres en el área científica a nivel nacional.

El presente proyecto es un material que puede ser utilizado por diferentes agentes sociales y por las futuras generaciones de niños y niñas de la comunidad. En primer término, las proyecciones de este proyecto son lograr su difusión dentro de la comunidad educativa preescolar pertenecientes a JUNJI Región Metropolitana y otros establecimientos que impartan educación parvularia, en diferentes ciudades, personas en situación de discapacidad auditiva, así como también a las familias chilenas que dentro de su núcleo familiar tengan a niños y niñas entre los 3 y 6 años de edad. En segundo término, revisar y actualizar el contenido de los productos generados a partir de procesos de retroalimentación y evaluación por parte de los usuarios objetivos, y poder continuar con la serie animada para abordar y profundizar en otros temas relacionados con las geociencias.

Actualmente tanto la serie como la guía pedagógica se encuentran disponibles en su página web www.geohistorias.cl y prontamente será transmitido por el Consejo Nacional de Televisión (CNTV), a través de su bloque infantil a lo largo de todo el país.

Palabras Clave: Educación, Preescolar, Divulgación, Geociencias, Desastres Socionaturales.

Financiamiento: Productos de divulgación del Programa Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (CTCI) 2021-2022.

Agradecimientos: Ministerio de CTCI, Xterrae, Ilustre Municipalidad de Curicó y sus departamentos de Educación y Gestión Ambiental, Fundación Te Apoyamos e Instituto para la Resiliencia ante Desastres.

Referencias:

- [1] Pedrinaci, E. et al. (2013). Alfabetización en Ciencias de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra 21(2). 117-129.
- [2] Quintanilla Gatica et al. (2017). Enseñanza de las ciencias e infancia: Problemáticas y avances de teoría y campo desde Iberoamérica. 260 p.
- [3] Ministerio de Educación (MINEDUC). (2018). Bases Curriculares Educación Parvularia. 131 p.
- [4] IPCC. (2014). Climate Change 2014, Synthesis Report. 151 p.
- [5] ONU. (1987). Informe Brundtland. 416 p.
- [6] Gobierno de Chile. (2009). Política Nacional de Educación Para el Desarrollo Sustentable. 14 p.
- [7] ONU. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. 40 p.
- [8] Mayega et al. (2015). Conociendo mi tierra: Geología en la primera infancia. Actas XIV Congreso Geológico Chileno. 443-445.

Geoturismo: Abriendo caminos hacia un aprendizaje significativo en la naturaleza

Francisca Sofia Aguilera Banchemo¹, Diego Muñoz Cupitty¹, Miguel Ángel Silva Ríos¹⁻²

(1) Apacheta Geoturismo, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Chile destaca como un destino de turismo de naturaleza reconocido a nivel internacional. Ha sido galardonado recientemente en los World Travel Awards: por tercera vez Mejor Destino Verde del Mundo en 2022 y por octava vez Mejor Destino de Turismo Aventura de Sudamérica en 2021, entre otros. Nuestra diversidad de paisajes naturales brinda las condiciones ideales para un turismo sustentable basado en la conexión entre la naturaleza y los visitantes. En este contexto, el geoturismo desempeña un papel esencial en promover la protección del medio ambiente y generar prácticas turísticas que consideren el cuidado de la Tierra.

Después de dos años como operador de geoturismo en la zona centro de Chile, hemos trabajado con más de 200 turistas nacionales e internacionales, de todos los rangos etarios, donde más del 80% calificó con un 7/7 nuestro servicio. Con esto en mente, compartimos nuestras reflexiones sobre el aporte que pueden realizar los estándares de turismo en iniciativas de divulgación científica y conservación del geopatrimonio. De esta manera, proponemos un diseño de la experiencia basado en cuatro etapas: **despertar la curiosidad, canalizar la curiosidad, la etapa de shock** y finalmente el **aprendizaje significativo**.

El primer acercamiento a los sitios de interés geológico y natural se realiza desde una perspectiva naturalista, que se caracteriza por la observación sin perturbación del entorno, fomentando preguntas. Llamamos a esto **"despertar la curiosidad"**, fácilmente alcanzable debido a la cualidad asombrosa de los paisajes chilenos. Algunas condiciones mínimas que resguardan este despertar para cualquier persona en una experiencia al aire libre y que se vinculan al estándar de experiencias turísticas son: comodidad, entretenimiento, seguridad, alimentación, confort térmico, entre otros.

Una vez despertada la curiosidad, el rol del/la guía es **canalizarla**, incentivando preguntas y facilitando respuestas entre los mismos participantes. Una herramienta esencial es una hoja de ruta de la experiencia basada en el relato geoturístico y que incluya, como mínimo, paradas, horarios, atractivos escénicos, posibles preguntas, explicación, actividades a realizar y recursos.

El relato geoturístico debe incluir una variedad de disciplinas y aproximaciones en la hoja de ruta, dada la evidente relación entre elementos de patrimonio geológico y otros elementos del patrimonio natural y cultural. Para guías geólogos/as se debe tener especial cuidado en el uso del lenguaje técnico y ponderar la profundidad en la explicación de los fenómenos. Pueden usarse analogías cercanas a la vida cotidiana y preparar un relato que sea aprobado por personas fuera de la esfera técnica.

Uno de los atributos diferenciadores del relato geoturístico es la inmensidad de sus escalas, tanto espaciales como temporales, y el punto cúlmine de la experiencia se da al llegar a un momento en que se comparan las escalas de la naturaleza con la escala humana. En la **etapa de shock**, tras visitar y comprender un paisaje desde una aproximación naturalista con una mediación del geoturismo, e integrar las escalas temporales y espaciales, se llega al inevitable cuestionamiento de cómo ha influido la humanidad en los sistemas naturales de la Tierra. Esto podría suceder, por ejemplo, luego de conocer, maravillarse y estudiar un valle glaciar, al preguntarse cómo han retrocedido los glaciares en los últimos 100 años.

Es decir, comparar las magnitudes de la escala geológica con la humana entrega un momento de revelación sobre la posición de los seres humanos en el planeta y las consecuencias de nuestras acciones. Para entregar perspectiva a este momento de shock se pueden introducir conceptos como el Antropoceno, cambio climático, límites planetarios, entre otros, con una profundidad que dependerá del tipo de público de la experiencia.

Tras este momento cúlmine se obtiene una conclusión local basada en la observación, la ciencia y la propia experiencia, la que puede evolucionar a una mirada regional e incluso global. El hilo de la experiencia completa al aire libre revela la importancia y fragilidad de los ecosistemas y paisajes como parte de nuestro patrimonio natural, llevando a un **aprendizaje significativo** y sentido de responsabilidad ambiental que puede marcar un cambio en la vida de las personas y en su forma de aproximarse al medio natural. Así, creamos conciencia sobre cómo la conservación de nuestro patrimonio natural y cultural es beneficiosa para las generaciones actuales y futuras, aportando a la sustentabilidad.

Proponemos esta experiencia en cuatro pasos como una herramienta de aprendizaje significativo y sensibilización respecto a la naturaleza, que contribuye al rol del geoturismo en el desarrollo de personas responsables con el medio ambiente.

Palabras Clave: Geoturismo, Educación geológica, Educación ambiental, Naturalismo, Turismo de naturaleza.

The 100 First IUGS Geological Heritage Sites: 3 lugares de Chile en la primera selección de geositos de relevancia internacional

Manuel Arenas Abarca¹, Felipe Fuentes C.¹, Felipe Espinoza G.¹, Camilo Vergara D.²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería

(2) FUNDESOL Cajón del Maipo

Los sitios de patrimonio geológico de la IUGS (IUGS Geological Heritage Site) son lugares clave con elementos y/o procesos geológicos de relevancia científica internacional que son usados como referencia y/o que han sido un aporte sustancial al desarrollo de las ciencias geológicas a través del tiempo (IUGS, 2022).

A fines de 2020 resurge la iniciativa de la IUGS para el reconocimiento de los geositos de relevancia mundial continuando de esta manera el trabajo iniciado en los años 90 del siglo pasado que solo tuvo un alcance europeo y no global como se esperaba.

El esfuerzo se tradujo en el proyecto ICP-731 (2021-2024) liderado por la Comisión Internacional para el Geopatrimonio de la IUGS y financiado el 2020 por el International Geoscience and Geopark Programme de la UNESCO (UNESCO, 2023). El proyecto en su primera etapa contó con la participación de 10 organizaciones internacionales y de cerca de 200 geocientistas de todo el orbe, incluyendo a 2 geólogos chilenos representando uno a Sernageomin, punto focal en el país, y otro representando a la Red de Geoparques Mundiales de la UNESCO de América Latina y el Caribe (GeoLAC).

El trabajo de 20 expertos de 13 países diferentes, incluyendo al profesional de Sernageomin, permitió establecer las definiciones y estándares que debía cumplir un geosito de relevancia internacional. Ese fue el primer paso del proceso que luego se amplió a cerca de otros 40 especialistas distribuidos por el planeta para que propusieran candidatos a geositos según las exigencias ya establecidas (IUGS, 2022). A Chile se le brindó la oportunidad de postular 4 geositos. Para su selección fueron propuestos 7 lugares por diferentes profesionales de la Subdirección Nacional de Geología de Sernageomin (SDNG). Éstos, tras ser revisados por un comité interno de la SDNG integrado por las jefaturas de 4 departamentos técnicos y el geólogo punto focal en Chile, fueron luego votados por 56 geocientistas de lo que entregó como candidatos a los siguientes geositos: Los Puquios del Salar de Llamara, el campo geotermal El Tatio, el complejo intrusivo Mioceno de Torres del Paine y las lavas de hierro del volcán Laco.

El complejo intrusivo Mioceno de Torres del Paine es un sitio de clase mundial para el estudio del del control estructural y la construcción de lacolitos bimodales someros; el campo geotermal El Tatio es el más grande y diverso campo geotermal en el hemisferio sur, con más de un centenar de diferentes manifestaciones superficiales; los puquios del salar de Llamara, localizados en el desierto de Atacama, contienen en sus salmueras tapetes microbianos similares a los primeros habitantes de la Tierra (IUGS, 2022); mientras que las lavas de hierro del volcán Laco son únicas en el mundo debido a su grado de preservación, estructuras superficiales y otras características de erupciones de hierro (magnetita).

A nivel global, 181 candidatos de 56 países fueron evaluados por 33 expertos para seleccionar los primeros 100 geositos globales de IUGS. Entre los finalistas se logró incluir 3 geositos de Chile, mientras que el cuarto, las lavas de hierro del volcán Laco, resultó preseleccionado entre los 200 primeros geositos globales.

Los primeros 100 sitios de patrimonio geológico de la IUGS fueron publicados como un libro de tapa rígida y en formato digital, cuyo lanzamiento se llevó a cabo en un evento de celebración de los 60 años de la institución en Zumaia, España, en noviembre de 2022 (Geoparkea, 2022) y donde se presentaron la mayoría de los 100 geositos. En esa oportunidad, los geositos complejo intrusivo Mioceno de Torres del Paine y campo geotermal El Tatio fueron expuestos por un representante chileno, incluyendo en esta última presentación una lámina del geosito Puquios del Salar de Llamara, destacando los estudios de la astrobiología que se desarrollan en ambos lugares.

Estar representados en esta primera selección de geositos de relevancia internacional permitió visibilizar entre los y las geocientistas el trabajo que se hace en Chile por la conservación de los lugares relevantes para las geociencias. Por otra parte, dado el impacto mediático causado por esta noticia, se logró llegar a un público no experto que pudo enterarse del origen y las características de estas maravillas geológicas cuyo valor trasciende nuestras fronteras y que son solo una pequeña muestra de la enorme e importante geodiversidad del territorio chileno.

Palabras Clave: geositos, iugs, libro, 100F.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Referencias:

- Geoparkea. 2022. The First 100. Disponible en <https://geoparkea.eus/eu/geoparkeari-buruz/proiektuak/iugs-globalgeosites>. Última visita el 17 de mayo de 2023.
- International Union of Geological Sciences (IUGS). 2022. The first 100 IUGS geological heritage sites. 153p. IUGS. Disponible en https://iugs-geoheritage.org/videos-pdfs/iugs_first_100_book_v2.pdf. Última visita el 17 de mayo de 2023.
- UNESCO. 2023. IUGS Geological Heritage Sites. International Geoscience and Geopark Programme. Disponible en <https://www.unesco.org/en/igpp/igcp-projects/731>. Última visita el 17 de mayo de 2023.

Inventario Nacional de Geositos: Un lustro de avances y desafíos

Manuel Arenas Abarca¹, Felipe Fuentes C.¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, Chile

Introducción

El año 2018 Sernageomin comenzó un proyecto para dotar al país de un registro sistemático de los geositos reconocidos en el territorio nacional. Tras acordar contenidos mínimos con los servicios geológicos de Iberoamérica (ASGMI, 2018), se comenzó a generar un inventario de geositos publicados en alguna instancia verificable (memorias de título, proyectos de geoparques, congresos y simposios, organismos científicos e instituciones del Estado). Esta primera versión contó con más de 500 registros y permitió hacerse un panorama general de los lugares considerados, por distintas razones, significativos por algunas personas o instituciones (Salazar *et al.*, 2021). El presente trabajo resume los avances y actualizaciones del inventario, además de exponer los desafíos y principales tareas pendientes tras la primera etapa.

Resultados

La siguiente etapa consistió en la homogeneización de los registros. Debido a la diversidad de fuentes, la información era de carácter muy heterogéneo en cuanto a su contenido, lo que era esperable dado el volumen de información. Además de la disminución del número de geositos con información suficiente para ser incluidos en el inventario, lo que fue compensado por la inclusión de nuevos registros publicados con posterioridad al año 2020, este trabajo permitió la sistematización de la información en diferentes aspectos.

Además de lo anterior, se amplió la cantidad de información a registrar para cada uno de los geositos. De 24 atributos iniciales se pasó a 39 atributos distribuidos de la siguiente manera: 2 de identificación del geosito (ID único, nombre); 9 de ubicación (región, provincia, comuna, localidad, topónimo, Lat/Long, Datum y altitud); 11 de datos geológicos (descripción geológica, edades cronoestratigráficas máximas y mínimas, edades cronológicas máximas y mínimas); 8 geopatrimoniales (justificación, escala de relevancia, valor, interés geocientífico, contexto geológico nacional); 2 de aspectos de conservación (figura de protección, estado de conservación); y 4 bibliográficas (fuente de la información, referencias bibliográficas, enlace a referencias y fecha de actualización de la información del geosito); además de un campo para un enlace a imágenes del geosito.

Con todas estas modificaciones y revisiones se diseñó una estructura para el inventario, la que se implementó como una base de datos georreferenciada (*geodatabase*) para el registro, manejo y despliegue de la información en diferentes formatos y plataformas (PortalGeoMin por ejemplo, <https://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>).

El análisis de la información compilada muestra que cerca del 44% de los geositos han sido reconocidos en memorias de título de diferentes universidades, siendo así la principal fuente de información de geositos en el país. En cuanto a la distribución geográfica, ésta es bastante heterogénea, existiendo una gran diferencia en el número de geositos reconocidos por región. Esto se explicaría por la cantidad de memorias de título concentradas en algunas regiones y la existencia de proyectos de geoparques que aumentan considerablemente el número de geositos en algunas de ellas. Por otro lado, sólo el 32% de los geositos reconocidos se encontraría protegido por alguna categoría de conservación vigente o por encontrarse dentro de un área de protección del Estado.

Consideraciones finales

El inventario de compilación o bibliográfico, en conjunto con el desarrollo de otras tareas, es un primer paso para la elaboración de un inventario sistemático que permita priorizar y proponer acciones de conservación para los geositos más importantes y amenazados.

Un aspecto fundamental aún pendiente es la adopción de contextos geológicos nacionales. Acordar los capítulos y aspectos más importantes de la historia y evolución geológica de nuestro país requiere del aporte y la confluencia de todas las disciplinas geocientíficas con el fin de asegurar la conservación de los aspectos más relevantes de la geodiversidad de nuestro territorio. Así, un inventario sistemático debería incluir los geositos más importantes de cada uno de los contextos geológicos nacionales.

El trabajo desarrollado hasta ahora permite a Sernageomin proporcionar las bases para discutir y adoptar términos comunes, contextos geológicos nacionales y criterios y métodos de valoración científica (Arenas y Fuentes, 2021; Fernández *et al.*, 2021). La elaboración de un inventario nacional de geositos, elemento clave para avanzar en la conservación del patrimonio geológico chileno, requiere ahora el consenso y trabajo conjunto de la comunidad geocientífica. El desafío que esto representa requiere la articulación de actores clave que lideren el trabajo y motiven la participación amplia de la comunidad geocientífica.

Palabras Clave: geositos, inventario, geopatrimonio, geoconservación.

Financiamiento: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Referencias:

- Arenas, M., Fuentes, F. 2021. Geopatrimonio y Geoconservación en Chile: propuesta de desarrollo y coordinación nacional. Presentación oral. Simposio Actualización de la Geología de Chile. Sociedad Geológica de Chile.
- Asociación de servicios geológicos y mineros de Iberoamérica (ASGMI). 2018. Bases para el desarrollo común del Patrimonio Geológico en los Servicios Geológicos de Iberoamérica. Inédito. Disponible en <https://asgmi.org/wp-content/uploads/2018/10/Bases-Metodologicas-Patrimonio-Geologico.pdf>. Última visita 16 de mayo 2023.
- Fernández, J., Alfaro, A., Fuentes, F., Sepúlveda, N., Arenas, M. 2021. Valoración de geositos: una propuesta metodológica integradora y basada en el análisis multicriterio. E-poster. Simposio Actualización de la Geología de Chile. Sociedad Geológica de Chile.
- Salazar, F., Fuentes, F., Arenas, M. 2023. National geosites inventory of Chile: preliminary results from compilation and homogenization stages. International ProGEO Symposium No. 10. Abstract book, pp. 25-26. Disponible en https://www.igme.es/publicaciones/publiFree/Abstract_Book_ProGEO_2Ed_2021.pdf. Último acceso el 16 de mayo de 2023.

Los Secretos de las Rocas: Revelando el Patrimonio Geológico del Parque Nacional Pan de Azúcar

Javiera Ruz-Ginouves¹⁻², Antonia Cornejo³, Francisca Aguilera⁴, Gerd Sielfeld¹⁻⁵, Felipe Aron¹⁻⁶⁻⁷

(1) Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Macul, Santiago, Chile

(2) University of Otago, Department of Geology, Dunedin, New Zealand

(3) Biodiversidad Chilena, Chile

(4) Apacheta Geoturismo, Chile

(5) University of Auckland, Faculty of Science, Auckland, New Zealand

(6) Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Macul, Santiago, Chile

(7) *Ahora en Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile

Conocer y entender sobre los procesos geológicos que dan forma a nuestro planeta es fundamental para la sostenibilidad de las comunidades. Por ejemplo, en zonas tectónicas activas como los Andes de Chile, donde frecuentemente confluyen diversas amenazas como terremotos, erupciones volcánicas y aluviones, la comprensión de estos procesos a todos los niveles de la sociedad es crucial para lograr una convivencia armónica con el ambiente y construir sociedades resilientes. Sin embargo, es común, especialmente en Chile, que este saber está limitado a ambientes técnicos y académicos y no forme parte del conocimiento local. Esto se acentúa en parte porque, históricamente, las ciencias de la Tierra no han sido incorporadas cabalmente en los currículos escolares. Para contribuir a cerrar esta brecha, diseñamos y construimos una exposición geológica interactiva y didáctica en el Centro de Información Ambiental del Parque Nacional Pan de Azúcar (PNPA), Atacama, Chile. El Parque es un área silvestre protegida en la costa del desierto más árido del mundo y alberga una biodiversidad endémica única y frágil. Aunque esto, junto a los paisajes majestuosos del desierto costero atraen a más de diez mil visitantes al año, uno de sus mayores patrimonios naturales es la geología, la cual, hasta la fecha, no se encontraba cabalmente explotada y puesta en valor como atractivo principal y distintivo del lugar. En la exposición los visitantes pueden aprender sobre conceptos básicos de geología y amenazas geológicas, empleando los recursos naturales que ofrece el lugar.

Debido a sus afloramientos excepcionales de casi todos los tipos de rocas, el PNPA revela una parte importante de la evolución geológica de los Andes. Esto lo convierte en un lugar ideal para aprender geología, tanto para estudiantes de la disciplina como para cualquier persona interesada y curiosa por las ciencias de la Tierra. Las rocas del Pan de Azúcar cuentan una historia de más de 300 millones de años de los procesos primordiales de la formación de los Andes. Rocas metamórficas paleozoicas exponen la fábrica del prisma de acreción de la zona de subducción entre un proto Pacífico y Pangea, calizas ricas en fósiles nos hablan sobre la rica fauna existente en las cuencas marinas del Jurásico, y secuencias sedimentarias de depósitos aluviales en las quebradas nos recuerdan de que el paisaje es dinámico y activo, y que eventos catastróficos como los aluviones del 2015 han ocurrido frecuentemente en el pasado. La exposición se diseñó para enseñar, mediante un lenguaje simple, en visitas guiadas o autoguiadas, conceptos geológicos como la escala de tiempo geológico, la tectónica de placas, el ciclo de las rocas, los volcanes, la formación de cordilleras y los peligros geológicos asociados. Además, construimos un jardín de rocas al aire libre con muestras locales de gran volumen, organizadas en un sendero para narrar un viaje por la historia geológica del Parque, y un laboratorio para explorar propiedades físicas y químicas de las rocas, minerales y fósiles. Esta exposición permanente se financió con el proyecto CIENCIA PÚBLICA-1201219 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, donde colaboraron instituciones públicas, privadas, académicas y locales, incluyendo la Corporación Nacional Forestal (CONAF), la Municipalidad de Chañaral, la empresa de turismo Biodiversidad Chilena, la comunidad y sindicato de pescadores de la Caleta Pan de Azúcar, y la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). El contenido de esta se generó a partir de 4 versiones del curso de Geología de Campo (Capstone ICE-2023) del Major de Geociencias de Ingeniería de la PUC, donde se elaboró un mapa geológico actualizado y detallado del Parque.

La iniciativa ha sido muy bien recibida por la comunidad de Atacama y por los visitantes en general. Con ella se ha contribuido a mejorar y diversificar tanto la oferta turística de intereses especiales de Atacama, como el desarrollo local y regional. Este espacio ha permitido entrenar a guardaparques, tour-operadores, la comunidad de la Caleta y a docentes escolares para que se transformen en difusores del conocimiento geocientífico a la sociedad. La experiencia de transformar el aprendizaje adquirido en los cursos de geología de campo a productos de educación transferibles más allá del aula académica — y a poner en valor el patrimonio geológico — ha sido positivamente acogida por los estudiantes. Pensamos que modelos similares en otras áreas silvestres protegidas, que reciben a miles de visitantes, pueden convertirse en motores eficientes de transferencia y educación de la geología en Chile.

Palabras Clave: Geopatrimonio, Educación geológica, Parques nacionales, Parque Nacional Pan de Azúcar, Atacama.

Financiamiento: Proyecto CIENCIA PÚBLICA-1201219 (2020-2021) del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile. Corporación Nacional Forestal (CONAF), Atacama.

El Bien Nacional Protegido del Cerro Rosado de Villa Ortega como un escenario para el turismo de intereses especiales en la Región de Aysén, Chile

Claudio Avendaño¹, Iván Soto¹

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

El turismo de intereses especiales es una actividad que satisface las necesidades y preferencias específicas de los visitantes. La Región de Aysén es reconocida a nivel mundial como un destino turístico, especialmente por su impresionante variedad de atractivos naturales, en donde la geodiversidad es un aspecto sobresaliente. La Seremi de Minería de Aysén ha llevado a cabo un inventario exhaustivo de más de 180 geositos, de los cuales 21 han sido reconocidos por la Sociedad Geológica de Chile. Estos hallazgos evidencian el valioso patrimonio geológico regional, que abarca una historia evolutiva que se extiende por más de 350 millones de años. Además, este inventario se encuentra distribuido en 19 Contextos Geológicos Temáticos (Benado, J. et al. 2020). La comunidad geológica asume la responsabilidad de establecer y poner en marcha vínculos entre la geología y la sociedad. Estos esfuerzos se complementan con las actividades rurales realizadas en la región, como cabalgatas, caminatas y desayunos campestres. De esta manera, se promueve una experiencia enriquecedora que combina el conocimiento geológico con la participación en las actividades del entorno.

El Bien Nacional Protegido (BNP) del Cerro Rosado se encuentra aproximadamente a 22 km al noroeste de la ciudad de Coyhaique, en la región de Aysén, Chile. Este espacio de conservación de terrenos fiscales resguarda un valioso patrimonio geopaleontológico y biológico.

La zona se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas de composición intermedia a ácida (dacitas, andesitas, tobas, areniscas y en subordinadamente calizas marinas). Se pueden observar rasgos geomorfológicos glaciares, como la configuración de los valles y la presencia de grandes bloques erráticos que fueron depositados por el retroceso de los glaciares. Los estudios han identificado tres sitios paleontológicos en los cuales se han encontrado maderas petrificadas y carbonizadas de distintos tamaños con excelente preservación. Estos fósiles permiten observar anillos de crecimiento, formas y colores de la corteza, así como evidencias de bioerosión producidas por insectos. Además, se han registrado calizas marinas con estromatolitos, moluscos y otros organismos, que aún se encuentran en estudio (Pérez-Barría, et al. 2022). El geosito en donde existen maderas petrificadas, se destaca por su alto valor científico, rareza y representatividad. Sin embargo, aún se encuentra en espera de ser categorizado como geosito por la Sociedad Geológica de Chile (Guajardo, F. 2022).

En la década de los 90, expediciones científicas conjuntas entre Japón y Chile revelaron la presencia de tres especies de maderas fósiles pertenecientes al género *Araucaroxylon* en las rocas volcánicas de la Formación Divisadero (Pérez-Barría, et al. 2022). Posteriormente, en los años 2021 y 2022, el Museo Regional de Aysén lideró nuevas expediciones científicas que brindaron información actualizada sobre la petrografía, estratigrafía y paleontología del área, así como la elaboración de mapas de geología y zonificación para la protección del patrimonio geológico y paleontológico (Guajardo F. 2022; Cea, P. 2022).

La zonificación del BNP se llevó a cabo considerando criterios geológicos y paleontológicos, resultando en la división del área en cuatro zonas distintas. La primera y más relevante es el área de exclusión, que tiene como objetivo proteger los fósiles de maderas petrificadas y carbonizadas de gran valor. A continuación, se encuentra el área de restricción, que abarca el resto del polígono del BNP y establece ciertas restricciones en cuanto a acceso y actividades permitidas. La tercera zona es el área potencialmente relevante, la cual engloba sitios que aún no han sido explorados y que presentan un alto potencial para futuros descubrimientos. Por último, se encuentra el área de uso público, que abarca terrenos privados y proporciona accesos a la zona protegida, permitiendo que el público en general pueda disfrutar y aprender sobre este valioso patrimonio natural (Avendaño, C. 2022).

Actualmente, el BNP del Cerro Rosado carece de una administración, lo que dificulta considerablemente el control de los visitantes. Como resultado, es común la ocurrencia de robos y la acumulación de materiales fósiles. Además, la presencia de múltiples accesos complica aún más esta tarea de vigilancia y protección. Es por esto, que se requiere la planificación y gestión del plan de manejo regulador.

Los recursos naturales del Cerro Rosado ofrecen oportunidades tanto para el estudio científico como para actividades recreativas. Mediante la colaboración entre actores turísticos, organismos públicos y científicos, será posible garantizar la geoconservación de este valioso patrimonio fosilífero de la región.

Palabras Clave: Geopatrimonio, Geoconservación, Troncos fósiles, Cerro Rosado, Geoturismo.

Agradecimientos: A Leonardo Pérez, paleontólogo, al Magíster de Paleontología 2021 de la UACH. A J. Benado y F. Andrade de la Seremi de Minería Aysén. A Luis Acevedo, lugareño y actor turístico del Cerro Rosado.

Referencias:

- Avendaño, C. (2022). Geoconservación del Sector de los Petrificados de Cerro Rosado, Villa Ortega, Región de Aysén, Chile. Puesta en Valor y Zonificación. Tesina para optar al Título de Geólogo. 126 pp. Universidad Católica del Norte, Antofagasta.
- Benado, J., Andrade, F., Muñoz, E., Reyes, F., Crisóstomo, E., Quilamán E., Valenzuela, D. (2020). Geositos de la región de Aysén (Chile): resumen de la historia geológica regional, propuesta de contextos geológicos temáticos e inventario. Revista de Aysenología 8: 4-19.
- Cea, P. 2022. Estratigrafía y petrografía del sector río Correntoso-cerro Rosado entre las coordenadas 45°20'-45°23'S y 72°09'-72°05'W, Región de Aysén, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 85 pp. Concepción.
- Guajardo, F. (2022). Geología y Patrimonio del Sector Río Correntoso – Cerro Rosado, entre las coordenadas 45°20'-45°23' S y 72°10'-72°5' W, Región de Aysén Chile. Tesis para optar al Título de Geólogo (Inédito): 124 pp. Universidad Andrés Bello, Viña del Mar.
- Pérez-Barría, L., Cea, P., Avendaño, C., Soto, I., Guajardo, F., Saldívar, P., Varela, J.P. (2022). Redescubriendo el "Bosque Fósil de Cerro Rosado" (Región de Aysén, Chile). 2do Congreso Chileno de Paleontología, San Vicente de Tagua Tagua, noviembre 2022.

GeoXplora Crusoe: potenciando el valor de la geodiversidad de Juan Fernández a través de la Realidad Aumentada

Laura Becerril Carretero¹, Carolina Bustamante Del Sante², María Consuelo Martínez Martínez³, Pia Macarena Navarro Herrera⁴, Felipe Ignacio Paredes Vergara²

(1) Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile.

(2) Fundación Endémica, Archipiélago Juan Fernández e Islas Desventuradas.

(3) Periodista Independiente.

(4) Geóloga Independiente.

Las nuevas tecnologías se han convertido en herramientas fundamentales para acercar la ciencia más compleja a todos los públicos. En concreto, las Geociencias, aunque están presentes en la vida cotidiana de las personas y son fundamentales para entender el entorno en el que vivimos, resultan a veces inaccesibles para la población. Esto es debido, entre otros factores, a la propia complejidad de sus disciplinas y a la poca formación existente en estas materias fuera de la academia. La realidad aumentada (RA) se presenta actualmente como uno de los avances tecnológicos transformadores a través de la creación de contenidos interactivos y en 3D que permite educar, involucrar y hacer que las Geociencias sean más accesibles a un público más amplio y diverso.

GeoXplora Crusoe es un proyecto del programa Ciencia Pública (CP22-P067; Productos de Divulgación; Ministerio de Ciencia Chileno) que tiene como objetivo el desarrollo e implementación de una aplicación de realidad aumentada y geolocalización, con contenido geológico y oceanográfico para la isla de Robinson Crusoe (Archipiélago Juan Fernández). Se trata del desarrollo de una aplicación para dispositivos móviles inteligentes (Smartphones - tecnología iOS y Android) que permita entregar información fundamental sobre geología y oceanografía, además de una visualización in situ simple e interactiva de los diferentes y más importantes hitos geológicos de la isla.

Este proyecto se basa en la necesidad de vincular a la comunidad de Juan Fernández y a los turistas que llegan a la isla con el valor de la geodiversidad y del territorio de lugares emblemáticos, fortaleciendo las experiencias de senderismo y potenciando el turismo científico. Su desarrollo, implementación y uso permitirá dotar a la comunidad de una base científica en materia geológica y oceanográfica, hasta ahora poco conocida, para que puedan comprender de mejor manera el territorio que habitan y a su vez ofrecer experiencias de mayor calidad al turismo que reciben.

La aplicación permitirá la identificación de los usuarios mediante registro, la geolocalización de sendero y el reconocimiento de 15 hitos geológicos y oceanográficos. Dispondrá de cápsulas multimediales inclusivas en español e inglés (videos, infografías y/o sonidos) basadas en realidad aumentada y de despliegue atractivo de información, más señalética no invasiva con iconografía y sistema braille, mediante QRs y tótems a lo largo de los senderos. Los usuarios de la aplicación estarán registrados y podrán tomar fotografías que indican la fecha, hora y lugar durante su trayecto por los senderos con el fin de ser compartidas en redes sociales y así promover y difundir el valor geológico y oceanográfico de la isla.

Con este proyecto se pretende divulgar el conocimiento geológico, potenciar el contacto con la naturaleza a través del senderismo, preservar el geopatrimonio de la isla y dar un valor turístico añadido potenciando el Geoturismo, con el objetivo último de educar a las nuevas generaciones favoreciendo el desarrollo sostenible y fomentando actitudes y habilidades relacionadas con el respeto por nuestra Gea. La experiencia a través de la app permitirá a los usuarios convertirse en exploradores de la ciencia, incentivando el pensamiento crítico desde la exploración y potenciando la curiosidad, haciendo que el recorrido por la isla sea una experiencia "geomemorable".

Palabras Clave: Geopatrimonio, Islas Volcánicas Oceánicas, Realidad Aumentada, Robinson Crusoe, Geoturismo.

Financiamiento: GeoXplora Crusoe es financiado por el Programa Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en la categoría Productos de Divulgación. CP22-P067.

Agradecimientos: Agradecemos al Ministerio de CTIC, UOH y Fundación Endémica. A la Municipalidad de JF, CONAF y la Ag. de Turismo de JF. Agradecimientos especiales a la comunidad fernandeziana por todo su apoyo.

Meteoritos en Chile: Un análisis de la pérdida del patrimonio meteorítico nacional y los desafíos asociados a su conservación

Camila Caviedes Cameron¹⁻⁴, Emanuel Cabrera-Quinteros³, Millarca Valenzuela Picón²⁻⁴, Gabriel Pinto Morales¹

(1) Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias, INCT, Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile.

(2) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

(3) Universidad de Antofagasta, Departamento de Derecho, Facultad de Ciencias Jurídicas, Av. U. Antofagasta 02800, Antofagasta, Chile

(4) Centro de Astrofísica y Tecnologías Asociadas CATA, Camino El Observatorio 1515, Las Condes, Santiago, Chile

En el año 2005 el número de meteoritos encontrados en Chile registrados oficialmente en el Meteoritical Bulletin era de ~60 meteoritos [1]. En el año 2018 este número ascendió significativamente a 1168 meteoritos [2], y solo cinco años después, la cifra llegó a los 2780 meteoritos registrados (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>), más del doble del número registrado en el año 2018. De esta cantidad, el 71% se encuentra en el extranjero, distribuido en países como Francia, Estados Unidos, Rusia, y otros; y solo un 29% se especula se encuentra en territorio nacional, ya que de ese 29%, el 76% está bajo propiedad de coleccionistas privados, por lo que las muestras pueden ser comercializadas sin la necesidad de entregar registro a alguna entidad gubernamental.

Esta realidad fue propiciada por el descubrimiento de áreas densas de recolección (DCA por su sigla en inglés) de meteoritos en el desierto de Atacama desde el 2005 [1]. Las publicaciones asociadas reportaron inicialmente una densidad de 9-12 meteoritos por km², con una masa total >10 g para el área de San Juan [3], y de hasta 225 meteoritos por km², con una masa total >10 g para El Médano y Caleta El Cobre [4].

Varias iniciativas se han llevado a cabo para legislar la protección de meteoritos en Chile. En el año 2017, se presentó una ley específica para este tipo de material, a través del comité legislativo del senador Guido Girardi. Y en el año 2021 dentro de la Ley de Patrimonio, donde por primera vez se le daba a los meteoritos el estatus de "patrimonio mueble". Ninguna de estas iniciativas prosperó, tanto por razones políticas, como por desconocimiento del valor científico - patrimonial de los meteoritos en el público general y político, este último a cargo de legislar estos materiales en Chile [2].

Los meteoritos son una fuente de información única, que nos entregan información directa de diferentes cuerpos progenitores de meteoritos, como son los asteroides, Marte o La Luna, así como fotografías instantáneas de procesos del Sistema Solar primitivo y su evolución en el tiempo. Dichos procesos incluyen la condensación y aglutinación de los primeros sólidos en la Nebulosa Solar, alteración térmica y acuosa en el cuerpo original, diferenciación magmática, desarrollo de un regolito superficial por meteorización espacial y una muestra temporal de procesos dinámicos evidenciados por las estructuras de impacto que se observan en las superficies de asteroides, La Luna o Marte. Además los meteoritos más primitivos (con grado petrológico específico), nos permiten conocer los momentos previos a nuestro Sol, a través del estudio de los granos presolares. Por otra parte, existen dos grupos de meteoritos que son particularmente útiles para la astrobiología: las condritas carbonáceas (que entregan la química prebiótica (etapa inicial del Sistema Solar), y las acondritas (comprensión de la historia temprana de la Tierra, y las posibles formas de vida pasadas en otros cuerpos planetarios). En resumen, el aporte a nivel científico de los meteoritos excede los límites descriptivos.

El proyecto de ley que proponemos busca regular la búsqueda, recolección, tenencia y manejo de los meteoritos en Chile, y tiene como objetivo principal establecer medidas que permitan preservar su valor científico, cultural e histórico, fomentando su estudio y conservación, así como también promover el acceso a las muestras a la comunidad científica nacional e internacional. Esto se quiere llevar a cabo a través de distintos principios fundamentales, y protocolos de búsqueda y recolección, que permitan la preservación de las muestras recolectadas, y su registro material. Con esto se quiere conocer: (1) Las áreas que están siendo exploradas, (2) reducir los riesgos de daño y contaminación de las muestras, (3) mantener un registro del material recolectado en Chile permitiendo el estudio y colaboración entre instituciones y organismos nacionales e internacionales, (4) resguardar los geositos asociados a impactos que están presentes en nuestro territorio y actualmente son víctima del accionar inconsciente de algunas personas, (5) promover la colaboración y disponibilidad de las muestras para estudios nacionales o internacionales, y (6) implementar sanciones en pro de la conservación del patrimonio nacional, según la gravedad de la infracción.

El escaso apoyo que vive esta iniciativa confiere efectos adversos para el patrimonio nacional, ya que no se logra tener un registro de las áreas que están siendo barridas por comitivas nacionales e internacionales; al mismo tiempo las metodologías aplicadas por dichas comitivas no siempre van en pro de la preservación de la data que conservan las muestras, malogrando la información de alto valor científico que conceden los meteoritos [5].

Palabras Clave: meteoritos, protección, manejo, patrimonio.

Agradecimientos: Agradecemos a todas las personas que han tenido la disponibilidad de apoyar, contribuir o aportar en la búsqueda de una ley que proteja los meteoritos en Chile.

Referencias:

- [1] Muñoz, C., Guerra, N., Martínez-Frías, J., Lunar, R., Cerda, J., 2007. The Atacama Desert: A preferential arid region for the recovery of meteorites - Find location features and strewnfield distribution patterns. *Journal of Arid Environmental* 71: 188-200.
- [2] Valenzuela, M. 2018. Discutiendo la propuesta de ley de protección de meteoritos. Resumen para el XV Congreso Geológico Chileno, Concepción.
- [3] Gattacceca, J., Valenzuela, M., Uehara, M., Jul, T., Giscard, M., Rochette, P., Braucher, R., Suavet, C., Gounelle, M., Morata, D., Munayco, P., Bourrot-Denise, M., Bourles, D., Demory, F. 2011. The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile). *Meteoritics & Planetary Science* 46, Nr 9, 1276-1287.
- [4] Hutzler, A., Gattacceca, J., Rochette, P., Braucher, R., Carro, B., Christensen, E., Cournede, C., Gounelle, M., Laridhi Ouazaa, N., Martinez, R., Valenzuela, M., Warner, M., Bourles, D. 2016. Description of very dense meteorite collection area in western Atacama: Insight into the long-term composition of the meteorite flux of Earth. *Meteoritics & Planetary Science* 51, Nr 3, 468-482.
- [5] Lee, N. N., Fritz, J., Fries, M. D., Gil, J. F., Beck, A., Pellinen-Wannberg, A., ... & Hofmann, B. A. (2017). The extreme biology of meteorites: their role in understanding the origin and distribution of life on Earth and in the Universe. *Adaption of Microbial Life to Environmental Extremes: Novel Research Results and Application*, 283-325.
- [6] Valenzuela, M., Benado, J. (2018). Meteorites and Craters Found in Chile: A Bridge to Introduce the First Attempt for Geoheritage Legal Protection in the Country. In: Acevedo, R., Frías, J. (eds) *Geoethics In Latin America. The Latin American Studies Book Series*. Springer, Cham.

Propuesta de museo de sitio del aluvión de 1993 en la Quebrada de Macul, a 30 años del desastre socio natural

Juan Pablo Contreras¹, Leslie Huidobro²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile
(2) Universidad Nacional Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile

Según el censo del año 2017, la Región Metropolitana de Santiago tenía más de 7 millones de habitantes, lo que representaba en ese entonces, más de un 40% de la población total del país. La ciudad de Santiago ha experimentado un proceso de urbanización falto de regulación respecto de los peligros geológicos que afectan a la ciudad, principalmente en la proximidad del piedemonte precordillerano. En esta zona los principales peligros son el riesgo de flujos aluvionales provenientes de las principales quebradas de la Sierra de Ramón (Lara y Sepúlveda, 2010) y el riesgo sísmico asociado con la presencia de la falla San Ramón (Pérez *et al.*, 2014). Ambos riesgos contrastan en sus períodos de recurrencia y, por lo tanto, en el peligro que representan para la población. Mientras para la falla San Ramón la recurrencia se ha estimado del orden de miles de años (Vargas *et al.*, 2014), para los flujos aluvionales que alcancen la calle Tobalaba la recurrencia es menor a 100 años (Farías *et al.*, 2016).

Se hizo un estudio de Geopatrimonio de los flujos de detritos que se ubican en el frente cordillerano de Santiago como una herramienta para la vinculación de la población con el medio que habita. Se utilizó la metodología propuesta por la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI) y se incluyeron 6 geositos ubicados en las cuencas de San Ramón, Macul y Lo Cañas Panul, (Huidobro, 2022). Este conocimiento del entorno ayuda para generar conciencia en la población acerca de los riesgos geológicos a los que se exponen y sensibilizar a las autoridades para la generación de políticas públicas de la reducción de este riesgo.

El geosito que más destaca es el de la propuesta de Museo de Sitio del aluvión de 1993, en el Centro Intercultural Quebrada de Macul (CIQMA) que se ubica en la ribera sur de la Quebrada de Macul en la calle María Angélica de la comuna de la Florida. Ahí se levantó un memorial en honor a las 26 personas fallecidas y 8 desaparecidas que perdieron la vida durante el evento del 3 de mayo de 1993. Además, se preserva aún la anatomía del depósito de este aluvión que incluye numerosos bloques rocosos dispuestos de manera aleatoria, secciones expuestas del depósito con cerca de 2 metros de espesor y vestigios de las casas siniestradas de las poblaciones Progreso y Esfuerzo.

Esta combinación de elementos y tipos de patrimonio en el Museo de Sitio permite vincular la memoria histórica asociada al aluvión de mayo de 1993 y la educación acerca de los flujos de detritos y sus consecuencias. Ahí se puede reflexionar sobre la importancia de tener el conocimiento de los fenómenos naturales que ocurren en el territorio que se habita y comprender los peligros relacionados a estos fenómenos y sus posibles medidas de mitigación. La presencia de los bloques rocosos y el memorial crea una experiencia en la cual se entrelazan el pasado geológico y la memoria colectiva, resaltando la importancia de valorar y aprender de la historia en el contexto del geopatrimonio.

Todos estos elementos refuerzan que este es un excelente lugar para crear un museo de sitio del aluvión de 1993. Mantener activa la memoria colectiva con relación a los eventos ocurridos en el pasado es parte de la identidad de la población, y junto con la elaboración de políticas públicas que incluyan este riesgo tiene el potencial de salvar vidas en el futuro ante eventos similares.

Palabras Clave: Geopatrimonio, Museo de sitio, Aluvión 1993, Santiago, Quebrada de Macul.

Referencias:

- Farías, V., Escobar, P., Marín, M., Alfaro, A., Olea, P., Fernández, J., Arenas, M., Ramírez, P. (2016). Estudio exploratorio para el diseño de un sistema de monitoreo de remociones en masa, en las cuencas de San Ramón, Macul y Lo Cañas, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-64: 92 p. Santiago.
- Huidobro, L. (2022). Identificación del Geopatrimonio de flujos de detritos en el frente cordillerano de la ciudad de Santiago. Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencias de la Tierra. Memoria de título (Inédito): 162 p. Santiago.
- Lara, M., & Sepúlveda, S. A. (2010). Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental Earth Sciences*, 60, 1227-1243.
- Pérez, A., Ruiz, J. A., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., & Campos, J. (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramon Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, 71, 243-274.
- Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., Lacassin, R., & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083-1086.

Geociencias y territorio: Laboratorio Natural Desierto de Atacama

José Luque⁶, Sabrina Marín¹, Cecilia Demergasso¹, **Gabriel González⁴**, Fabián Araya⁶, Guillermo Chong⁴, Fernando Álvarez², Jenny Blamey⁷⁻⁸, Ricardo Cabrera⁹, Nicolás Guiliani⁹, Marco Méndez¹⁰, Marcia Montedónico¹¹, Rodrigo Palma¹¹, Ximena Retamal⁶, Emilio Ricci⁵, Susana Soto³, Cinthya Tebes¹

- (1) Universidad Católica del Norte, Centro de Biotecnología Profesor Alberto Ruiz, CBAR
- (2) Universidad Católica del Norte, Facultad de Economía y Administración
- (3) Universidad Católica del Norte, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias
- (4) Universidad Católica del Norte, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas
- (5) Universidad Católica del Norte, Facultad de Humanidades
- (6) Universidad Católica del Norte, Nodo LANDATA
- (7) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias
- (8) Fundación Científica y Cultural Biociencia
- (9) Universidad de Chile, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias
- (10) Universidad de Chile, Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias
- (11) Universidad de Chile, Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

El Desierto de Atacama (DA), en los Andes centrales del norte de Chile, es un laboratorio natural a nivel planetario en varias disciplinas. El trabajo transdisciplinario realizado por el Nodo Laboratorio Natural DA (LANDATA) nos permite hoy definir y evidenciar que el DA posee un marco geológico y biótico único, cuyas principales singularidades son: i) hiperaridez, resultado de una prolongada sinergia de procesos geológicos y bioquímicos, gracias a la cual hoy es posible observar los relieves conservados más antiguos del planeta, depósitos salinos únicos, registros paleoclimáticos, signos de la vida y del legado de las sociedades humanas que habitaron el territorio, y la claridad excepcional del cielo que hace del DA un polo mundial para la exploración astronómica y una ventana para acercarnos al origen; ii) manifestaciones únicas de la tectónica de subducción como la segunda cordillera más alta del mundo que incluye un sistema volcánico activo, el emplazamiento de franjas metalogénicas con yacimientos minerales, deformación de las rocas formando sistemas de fallas y plegamientos, intensa actividad sísmica; iii) ocurrencia de anomalías geoquímicas de escala planetaria, que resulta en una concentración de minerales de valor económico (cobre, yodo, boro, litio) y de la actividad minera; iv) fauna, flora y microbiota adaptadas a condiciones extremas, como hiperaridez, alta radiación solar, dominio salino, niveles elevados de arsénico en las fuentes de agua y alta oscilación térmica en las zonas no costeras; v) omnipresente impacto del Antropoceno, que potenciado por el cambio climático actual, es de tal magnitud que arriesgamos la extinción de formas de vida, el agotamiento de recursos naturales y el deterioro irreversible del paisaje geológico natural que es clave para recrear procesos que dan forma y vida a la Tierra. Muchos de los temas que son abordados por la investigación en Geociencias en el DA se relacionan íntimamente con estas singularidades. Invitamos a visualizar los resultados del trabajo conceptual, territorial y de análisis bibliométrico realizados en el marco del Nodo LANDATA, con enfoque en Geociencias, y discutir sobre las prioridades y puntos de vista desde donde abordamos nuestra tarea científica en este territorio.

Palabras Claves: Laboratorio Natural, Desierto de Atacama, Geociencias, Territorios, Sustentabilidad.

Financiamiento: ANID NODOS 0014.

Agradecimientos: Proyecto ANID NODOS 0014.

Geoparque Patagonia Verde: Avances y desafíos para aspirar al sello UNESCO

Tomás Martínez Ortega¹⁻², Juan Pablo Carrasco Lillo²

(1) Universidade do Minho, Ciências da Terra, Campus de Gualtar, Rua da Universidade 4710 - 057, Braga, Portugal

(2) Universidad San Sebastián, Sede Patagonia, Economía y Gobierno, Lago Panguipulli 1390, Puerto Montt, Chile

El proyecto Geoparque Patagonia Verde busca convertirse en un referente turístico y científico en la región. Este proyecto pretende abrazar y unificar los diferentes proyectos financiados por el Gobierno Regional de los Lagos que se han realizado en la zona desde el año 2015 en el marco del Plan Patagonia Verde. El principal objetivo del proyecto Geoparque es articular a los diferentes actores del territorio, públicos y privados, para la gestión holística del destino Patagonia Verde. De esta forma, a través de la conservación y utilización de su patrimonio natural y cultural, se espera poder realizar actividades científicas, educativas y turísticas que permitan mantener la calidad de vida, cultura y tradición de sus habitantes.

En la actualidad, la Universidad San Sebastián está ejecutando el programa "Fortalecimiento al desarrollo local con identidad territorial Palena (40044050-0)", financiado por el Gobierno Regional de la región de Los Lagos. El principal objetivo de este programa es revalorizar el patrimonio turístico de naturaleza y de los servicios ecosistémicos que caracterizan a la Provincia de Palena para fomentar el reconocimiento del territorio, la diversificación de la economía provincial y la inversión en servicios y productos propendiendo un desarrollo sostenible con enfoque territorial, participativo y con pertinencia cultural a través del estatus de Geoparque Patagonia Verde.

Además, se busca promover y poner en valor el destino Patagonia Verde con el sello del Geoparque, desarrollando productos y actividades locales con pertinencia territorial. En este sentido, el programa busca generar instancias de capacitación para desarrollar diferentes servicios y productos con denominación de origen, en un trabajo conjunto con Marca Chile. También se pretende actualizar los inventarios de geositos y establecer categorías para su gestión permitiendo priorizar la conservación de estos. Asimismo, se trabajará en la habilitación de las principales georutas y en la capacitación de actores locales para fortalecer el capital humano del destino y establecer la infraestructura necesaria para soportar actividades permanentes en educación y geoturismo, requisitos mínimos para poder adquirir el sello internacional UNESCO.

Se espera que a partir de este proyecto se puedan cumplir todos los requerimientos necesarios para poder incorporar a la Patagonia Verde a la red de geoparques mundiales de la UNESCO, una red que cuenta con la participación de 195 Geoparques en 48 países. Ser parte de esta red internacional sería un reconocimiento del valor y la importancia del Geoparque Patagonia Verde a nivel global, y permitiría promoverlo como un destino turístico sostenible y de alto valor científico y educativo en la región.

Para lograrlo será necesario generar alianzas estratégicas con los actores locales y establecer una figura legal que permita la participación de actores públicos y privados en la administración y ejecución de un plan de acción a 4 años, que a su vez permitiría la sostenibilidad del proyecto Geoparque. Además, será necesario seleccionar, en conjunto a las agrupaciones territoriales, algunos geositos para poder implementar infraestructura

Un desafío importante para el proyecto es la inclusión de Cochamó en los avances que se están llevando a cabo en la Provincia de Palena. Será necesario contar con la voluntad política para que esta comuna pueda participar administrativamente en la provincia aledaña, ya que, a diferencia de las demás comunas, Cochamó forma parte de la Provincia de Llanquihue y hoy no cuenta con financiamiento para avanzar en la misma dirección que el resto del territorio.

Palabras Clave: Geoparque UNESCO, Patrimonio Geológico, Desarrollo sostenible, Patagonia Verde, Geoconservación.

Financiamiento: Este trabajo es financiado por el programa "Fortalecimiento al Desarrollo Local con Identidad Territorial Provincia de Palena, Código BIP 40044050-0", financiado por el Gobierno Regional de Los Lagos y ejecutado por la Universidad San Sebastián, sede Patagonia.

Directrices de Geoconservación para el Geoparque Patagonia Verde

Tomás Martínez¹, Paulo Pereira¹, Manuel Schilling²

(1) Universidade do Minho, Departamento de Ciências da Terra, Campus de Gualtar, Rua da Universidade 4710-057, Braga, Portugal

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Av. Rector Eduardo Morales Miranda 23, Valdivia, Chile

Patagonia Verde es un territorio de 19,212 km² ubicado en la Región de Los Lagos, en el sur de Chile, que abarca los municipios de Cochamó, Hualaihué, Chaitén, Futaleufú y Palena, con una población total de alrededor de 22,000 habitantes. Es una zona tectónicamente activa con un paisaje andino altamente erosionado, moldeado tanto por procesos glaciales pasados como en curso. La región cuenta con volcanes activos, valles glaciares, fiordos, fuentes termales, montañas de granito y diversas secuencias sedimentarias con fósiles, lo que contribuye a su notable diversidad geológica. Este paisaje geodiverso coexiste con un 42% de áreas protegidas que cuidan los densos bosques siempreverdes de clima templado, y en los alrededores, pequeñas localidades patagónicas que están conectadas por la ruta conocida como la Carretera Austral (Ruta 7).

A pesar de su reconocimiento como Reserva de la Biosfera de la UNESCO por su excepcional biodiversidad, la importancia geológica de la región no había recibido una atención comparable hasta la fecha. En este contexto, presentamos el primer inventario de sitios de patrimonio geológico de Patagonia Verde, que consta de 91 sitios organizados en 14 contextos geológicos. Estos sitios fueron posteriormente analizados con una metodología cuantitativa, lo que permitió establecer directrices para el uso y conservación de estos.

Es importante destacar que estos sitios registran una historia geológica de 400 millones de años, desde las rocas más antiguas de la provincia, conocidas como las "rocas de Chaitenia," que albergan restos de un arco volcánico, como la metatonalita de Chaitén y el único registro de trilobites en la zona sur, en el sector de Buill, hasta otros más recientes relacionados con glaciaciones, erupciones y peligros geológicos. Algunos ejemplos notables incluyen los circos glaciares del Valle de Cochamó, el volcán Chaitén y el Lahar asociado en el año 2008, así como la remoción en masa de Villa Santa Lucía.

Este trabajo ha impulsado el desarrollo del proyecto Geoparque Patagonia Verde y la formación de la Asociación de Guías de Turismo Locales, y ha abierto la puerta a posibilidades de gestión que incluyen un modelo de gobernanza y un plan de acción.

Palabras Clave: Patagonia Verde, Geodiversidad, Patrimonio Geológico, Geoconservación, Andes del Sur de Chile.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el programa de Maestría Conjunta Erasmus Mundus PANGEA, patrocinado por el Programa Erasmus+ de la Unión Europea. www.master-pangea.eu.

Referencias:

- Martínez, T. (2022) Geoconservation Guidelines for Patagonia Verde (Southern Chile): Towards Its Recognition as a UNESCO Global Geopark. Master's Thesis, University of Minho, Braga, Portugal.

Tecnologías aplicadas a la preservación digital del Patrimonio: Levantamiento Fotogramétrico de restos Paleontológicos, sector Quebrada La Leonera, Región de Valparaíso

Sebastián Montti¹, Diego Ramirez², Sebastián Ortega Verdugo¹⁻³, Samantha Leiva Mera¹⁻³

(1) Gestión ambiental S.A., Rosario Norte 100, piso 14, Las Condes, Chile

(2) Getarq Arquitectura Ltda., Av. Simón Bolívar, La Reina, Chile

(3) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

La aplicación de herramientas y tecnologías como el escáner láser 3D y la fotogrametría, se implementan para la captura de datos directamente en terreno, lo que permite generar réplicas digitales de la realidad, con el fin de obtener modelos tridimensionales precisos y detallados de objetos, superficies y áreas que resulten de interés para diversas disciplinas del ámbito científico, industrial, ambiental, etc. Actualmente, estas tecnologías son aplicadas principalmente en la industria minera, pero en las áreas del Patrimonio Cultural y Natural estas herramientas cumplen un rol importante en la preservación digital de estructuras, edificaciones, petroglifos, fósiles, santuarios de naturaleza, entre otros, generando información documental de gran valor.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente corresponde al levantamiento fotogramétrico realizado en el sector denominado Quebrada La Leonera, ubicado entre las comunas de Los Andes y Calle Larga, Región de Valparaíso. En esta quebrada, se exponen restos paleontológicos, correspondientes a tafoflora y troncos fósiles de variadas dimensiones, llegando a presentar ejemplares de hasta 6 m de longitud. Estos se encuentran contenidos en un potente estrato de brechas sedimentarias correlacionables con la Formación Farellones. Las secuencias sedimentarias aquí expuestas, se caracterizan por presentar sucesiones de areniscas de granulometría gruesa, brechas, conglomerados y areniscas medias. Los restos paleontológicos presentes, se encuentran dispuestos típicamente en las partes altas de escarpadas laderas y perfiles de pronunciada pendiente a lo largo de la quebrada.

Debido a la compleja accesibilidad del sector y a las características de los restos paleontológicos antes mencionados, se realizó una digitalización del yacimiento mediante un escáner láser Faro Focus x150 S+, que entrega la base métrica y la precisión a la fotogrametría, un drone Phantom 4 RTK, con el cuál se realizó la fotogrametría y georreferenciación general del yacimiento, así como un drone Autel Evo II pro y una cámara Sony A7r4 para la fotogrametría cercana de precisión.

Metodológicamente hablando, 1) se colocaron marcas fotovisibles (targets), para vincular e integrar la información entregada por las distintas herramientas, 2) se utilizó el escáner láser a una distancia de 2 a 15 metros, cámaras y ópticas de calidad profesional para los restos paleontológicos de fácil acceso, 3) en el caso de los troncos de difícil acceso, donde no se podía llegar con el escáner, se utilizó el drone RTK para obtener la base métrica y el drone Autel Evo II pro para obtener las fotografías cercanas.

Para el post proceso de la información se utilizaron dos softwares, el Faro Scene y el RealityCapture, los cuales permiten generar las nubes de puntos y los modelos 3D texturizados como resultado de la integración y fusión de todas las fuentes de información. De esta forma se obtiene un modelo tridimensional de 6 especímenes de troncos fósiles y dos secciones geológicas.

La utilización de la fotogrametría y el escáner láser 3D resultan ser tecnologías muy beneficiosas a la hora de efectuar levantamientos de datos métricos y preservaciones digitales de sitios, obteniendo información valiosa tanto cuantitativa como cualitativa de los casos de estudio, incluso en aquellos sectores de difícil acceso. Otro de las utilidades de los productos y subproductos digitales que generan estos flujos de trabajo, es su gran aporte a la docencia, la investigación, el patrimonio y la ciencia en general, pero también, permite crear espacios de divulgación digital para la ciudadanía, democratizando el acceso a la información de forma inclusiva y entregando accesibilidad al conocimiento de manera telemática. Es en esto último, donde la preservación digital del patrimonio geológico o natural puede contribuir a que la ciencia se acerque más a la sociedad, abriendo procesos educativos con colaboración científica.

Palabras Clave: Fotogrametría, Escáner Láser 3D, Sociedad, Paleontología, Patrimonio.

Agradecimientos: Nuestros sinceros agradecimientos a Patrimonio Accesible por la asesoría brindada.

Identificación, caracterización y valoración de la geodiversidad en la comuna de Los Lagos, Región de Los Ríos, Chile: una contribución para el desarrollo del turismo, la educación y la conservación

Valentina Muñoz¹, Manuel Schilling², Felipe Santos¹, Ignacia Faúndez¹

(1) Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Escuela de Geología, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra, Independencia 621, Valdivia, Chile

Introducción

La comuna de Los Lagos, ubicada en la Región de Los Ríos, conserva el registro de diversos procesos geológicos ocurridos desde el Paleozoico hasta la actualidad. Destacan rocas asociadas al complejo metamórfico Trafún de ~350 Ma, registros de flora fósil en la formación Tralcán (Triásico) y los estratos San Pedro (Mioceno). Asimismo, se aprecian los mantos de carbón en los estratos Pupunahue asociada a la antigua minería de carbón en la zona, las erupciones del complejo volcánico Mocho Choshuencho, considerado como el séptimo volcán de mayor riesgo a nivel nacional, depósitos glaciofluviales y procesos más recientes de remociones en masa en el río San Pedro (1575 y 1960).

Uno de los eventos de remoción en masa más conocidos es el “Riñihuezo”, provocado por el terremoto de 1960 de magnitud 9.5 Mw y que produjo tres deslizamientos de grandes áreas de terreno, generando el represamiento natural del lago Riñihue. No obstante, los riesgos asociados fueron reducidos gracias a la acción coordinada de aproximadamente 450 paleros que trabajaron para que el desagüe del lago Riñihue fuera controlado, impidiendo la inundación de localidades río abajo. Cabe destacar, que su importancia es reconocida también por la Sociedad Geológica de Chile (SGCh), formando parte del listado de geositos a nivel nacional y siendo hasta ahora, el único en la Región de los Ríos.

La intensa actividad sísmica y volcánica, consecuencia del contexto geodinámico de subducción, sumada a los procesos coluviales, aluviales, fluviales, y glaciales de la comuna, han sido objeto de diversos estudios, y han dado como una gran y particular geodiversidad.

La geodiversidad es definida por Gray (2004) como el rango natural o diversidad de rasgos geológicos (rocas, minerales y fósiles), geomorfológicos (formas del terreno y procesos) y suelos, incluyendo sus relaciones, propiedades, interpretaciones y sistemas. Para este caso, el alto valor científico de algunos sitios de interés geológico está ligado a importantes hechos históricos en los que se integra el patrimonio natural y cultural.

En este contexto, se vuelve fundamental la conservación de la historia geológica de Los Lagos y parte de la región sur de Chile. Este trabajo tiene por objetivo identificar, caracterizar y evaluar sitios de interés geológico de la comuna de Los Lagos, de manera participativa para promover estrategias de desarrollo económico local y sustentable, mediante el turismo, la educación y la conservación. Asimismo, pretende contribuir al turismo en la comuna, el que está en desarrollo, aportando información para la interpretación del paisaje y a la educación de los peligros geológicos que ocurren en el territorio.

Este trabajo es parte del proyecto de Bien Público “Turismo de Montaña Los Ríos” además, es apoyado por el proyecto de Ciencia Comunitaria de la Universidad Austral de Chile, el Laboratorio Natural Andes del Sur, Núcleo Milenio Cyclo, la Municipalidad de Los Lagos y la Junta de Vecinos Piedras Mora de Riñihue.

Marco geológico

En la comuna Los Lagos se ubican tres morfoestructuras principales que se reconocen en gran parte de Chile: La Cordillera de la Costa, donde se observan principalmente rocas metamórficas asociada al Complejo Metamórfico Bahía Mansa, la Depresión Central caracterizada por la presencia de depósitos glaciares, y la Cordillera Principal, constituida por rocas intrusivas asociadas al batolito Norpatagónico y a depósitos volcánicos recientes.

Las rocas más antiguas en la comuna pertenecen al complejo metamórfico Trafún correspondientes a metaareniscas, pizarras y filitas del Devónico-Carbonífero. La formación Panguipulli es una secuencia de areniscas, lutitas y conglomerados cuarcíferos de 750 m de espesor del Triásico Medio, y junto a la formación Tralcán del Triásico Superior, se asocian a un complejo depositacional fluvio-lacustre. La formación Tralcán se caracteriza por sus conglomerados rojos intercalados con lutitas y areniscas, distinguiéndose plantas fósiles en niveles de fangolita. Los estratos San Pedro y Pupunahue del Oligoceno-Mioceno, son secuencias sedimentarias continentales (y parálicas en el caso de Pupunahue) con abundante flora fósil y mantos de carbón respectivamente. Esta última unidad está asociada a actividad minera desarrollada antiguamente en la zona.

Se distingue también el batolito Futrono Riñihue, intrusivo formado por granitos, granodioritas y tonalitas de relevancia regional ya que está asociado al arco magmático del Carbonífero-Pérmico, cubriendo una superficie de aproximadamente 300 km². Adicionalmente, se encuentra el plutón Huechulafquen que corresponde a una tonalita de hornblenda y biotita de grano medio a grueso perteneciente a una serie de cuerpos intrusivos del Jurásico que afloran en la región.

Entre los depósitos más recientes, se reconocen depósitos glaciares, fluviales, aluviales y de remociones en masa. Además, destacan productos volcánicos andesítico-basálticos asociados a las erupciones del complejo volcánico Mocho-Choshuencho (CVMCH). A partir del estudio de tefras postglaciares, Rawson et al., (2015) muestra que la frecuencia eruptiva de Mocho-Choshuencho es de una erupción moderada-grande cada ~ 440 años. Asimismo, realizaron datación por carbono de depósitos piroclásticos de 1,7 ka, que

sugieren una frecuencia eruptiva de una erupción explosiva cada ~ 150 año. Por último, los autores estiman que Mocho-Choshuenco ha erupcionado $\geq 20 \text{ km}^3$ de material piroclástico durante los últimos 18 ka, lo que convierte al CVMCH en uno de más productivos y activos de la ZVS desde la desglaciación, registrando su última erupción en 1864 de tipo subpliniana.

En cuanto a estructuras, es posible observar parte del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) que tiene cerca de 1.200 km de longitud y que controla la ubicación de la Zona Volcánica Sur (ZVS) entre los 38°S y 47°S acomodando la deformación a lo largo del intra-arco. Además, se aprecia la falla Chaquemahuida de rumbo noreste, y que pone en contacto al plutón Huechulafquen del Jurásico hacia el oeste, con la formación Panguipulli al este.

Metodología

Se aplicó la metodología propuesta por Brilha (2016) que sistematiza métodos propuestos para la elaboración y cuantificación de criterios aplicados en la realización de inventarios de patrimonio geológico y de sitios de geodiversidad, considerando estrategias de geoconservación.

En primer lugar, clarifican las 4 temáticas relacionadas al tópico del inventario, al valor que se le otorgará a este, por ejemplo, científico, turístico y/o educativo, la escala que abarcará el inventario y el uso de los sitios. Para este trabajo, se distinguió cómo tópico estudiar la geodiversidad destacando el valor científico, turístico y educativo a escala de comuna, en este caso, en la comuna de Los Lagos. El objetivo del inventario es promover el geoturismo, la educación y la conservación de la naturaleza. Además, se realizó una recopilación bibliográfica de la geología de la comuna donde se analizaron mapas geológicos, artículos y libros. En paralelo, se iniciaron conversaciones con actores del turismo, autoridades y científicos de la comuna para obtener más información de los lugares de interés geológico.

Luego, se ejecutaron 6 campañas de terreno en la comuna de Los Lagos durante los meses de enero y febrero del año 2023 donde se seleccionaron potenciales geositos, los que fueron evaluados de manera cualitativa utilizando la ficha modificada por Martínez (2017). Para la definición de contextos geológicos que forman parte de la comuna y con el objetivo de relatar la historia geológica del territorio a partir de los sitios, se utilizó el trabajo de Morgues et al. (2012).

Resultados

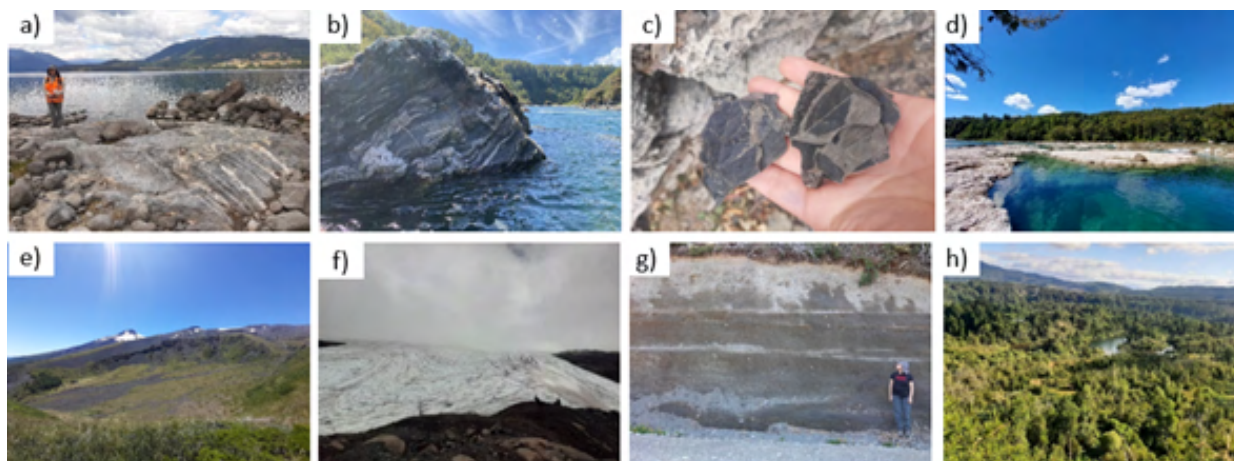
Se realizó un inventario preliminar con 29 sitios potenciales, no obstante, sólo 8 fueron seleccionados como geositos y sitios de geodiversidad (Fig. 1). Además, de los 22 contextos geológicos chilenos propuestos por Morgues et al. (2012) y modificado por Morgues et al. (2016), se obtuvieron 6 contextos representados en la comuna. Sumado a esto, y en relación con Santos (2019), para este trabajo se propone un nuevo contexto geológico denominado "Procesos Holocenos de remociones en masa (PHrm)" para representar los eventos de remoción en masa de la comuna.

Geositos/sitios de geodiversidad:

1. Rocas metasedimentarias paleozoicas de Punta Mariposa: Ubicado al oeste del lago Riñihue, se observó un afloramiento de rocas metasedimentarias con foliación leve y presencia de vetas y vetillas, tanto rectas como sinuosas cortándose entre sí. Además, se identificaron lentes de cuarzo y microfallas. Estas rocas corresponden al complejo metamórfico Trafún del Devónico-Carbonífero que representan al contexto "Terrenos exóticos y complejos de acreción (TCA)".
2. Esquistos del Devónico-Triásico del río San Pedro: Esquistos máficos y pelíticos con abundantes lentes de cuarzo, asociados al complejo metamórfico Bahía Mansa del Devónico-Triásico. Afloran en forma de ballena en el río San Pedro y corresponden a "Terrenos exóticos y complejos de acreción (TCA)".
3. Flora fósil del Oligoceno-Mioceno en sector Los Ulmos: Flora fosilizada dispuestas en láminas en fangolitas pertenecientes a los estratos San Pedro. Se estima que tienen una antigüedad de 23,5 millones de años y fueron observados en el sector Los Ulmos a cercanías del río San Pedro. Corresponden al contexto "Series continentales cenozoicas y sus fósiles (SCCz)".
4. Depósitos glacialacustres en el río San Pedro: Marmitas en láminas rítmicas de arcilla correspondientes a depósitos de lagos formados en períodos interglaciales. Las marmitas son generadas a partir de clastos transportados por el Río San Pedro, originando los pozones naturales. Se aprecian en el Río San Pedro, cercano al lago Riñihue. Representan el contexto "Procesos, geoformas y depósitos glaciales del centro y sur (PGGI)".
5. Cráter Tumba del Buey del CVMCH: Cráter de 800 m de diámetro y 140 m de profundidad, ubicado al SW del edificio volcánico. Moreno y Lara (2007) lo relacionan a la actividad explosiva con características freatomagmáticas. Es observable desde el mirador Tumba del Buey en la Reserva Nacional Mocho-Choshuenco. Corresponde al contexto "Volcanismo Neógeno sup-Cuaternario y campos geotermales (VNGsQ)".
6. Glaciar volcán Mocho: El glaciar Mocho tiene un área de $5,1 \text{ km}^2$ y se encuentra emplazado en la ladera SE del complejo volcánico Mocho Choshuenco. Es el único glaciar de la comuna y está dentro de los más importantes de la región. También corresponde al contexto "Procesos, geoformas y depósitos glaciales del centro y sur (PGGI)".
7. Oleada piroclástica del CVMCH en mirador Los Volcanes: Depósito homogéneo matriz soportado de ceniza de aproximadamente 4 m de potencia y 60 m de largo. Los clastos, en su mayoría, son de origen volcánico de composición andesítica-basáltica y se observan también capas horizontales de pómez. Moreno y Lara (2007) estiman una edad menor a 1,7 ka para este afloramiento.

Es apreciado en el mirador Los Volcanes en la Reserva Mocho-Choshuenco y se relaciona al contexto “Volcanismo Neógeno sup-Cuaternario y campos geotermales (VNgsQ)”.

8. Remoción en masa “Taco 3” del río San Pedro: Lagunas y crestas formadas por la remoción en masa ocurrida como consecuencia del terremoto de 1960. Son observables desde el mirador del Taco 3, ubicado en el borde norte del río San Pedro. Se asocian a “Procesos Holocenos de remociones en masa (PHrm)”



Se presentan los 8 geositos y sitios de geodiversidad seleccionados para el inventario. **a)** Rocas metasedimentarias paleozoicas de Punta Mariposa. **b)** Esquistos del Devónico-Triásico del río San Pedro. **c)** Flora fósil del Oligoceno-Mioceno en sector Los Ulmos. **d)** Depósitos glacifluviales en el río San Pedro. **e)** Cráter Tumba del Buey del CVMCH. **f)** Glaciar volcán Mocho. **g)** Oleada piroclástica del CVMCH en mirador los volcanes. **h)** Remoción en masa “Taco 3” del río San Pedro.

Discusión

La geodiversidad existente en la comuna de Los Lagos y el reconocimiento de un geosito por la SGCh, motivan la realización de un inventario que reúna geositos y sitios de geodiversidad para su uso educativo y turístico, otorgándoles la importancia necesaria para su conservación.

En cuanto a los logros de este trabajo, se puede mencionar que se identificaron, caracterizaron y evaluaron varios de los sitios de interés geológico obtenidos a través de la literatura geológica y conversaciones con actores conocedores de la comuna. Se seleccionaron 8 geositos y sitios de geodiversidad con potencial para apoyar el desarrollo local, la consolidación del turismo en la comuna y que representan la abundante y particular geodiversidad del territorio, junto a su interesante historia geológica.

Los 8 sitios seleccionados destacan por el moderado a alto valor científico y el alto valor del potencial de uso turístico y educativo. Dentro de estos, los geositos “Cráter Tumba El Buey del CVMCH”, “Oleada piroclástica del CVMCH en Mirador Los Volcanes” y “Glaciar volcán Mocho” son relevantes para la educación de los riesgos geológicos asociados a una posible erupción volcánica del CVMCH. Además, se caracterizan por las pocas limitaciones de uso, su bajo valor de degradación debido a que se ubican en áreas protegidas correspondientes a la Reserva Nacional Mocho-Choshuenco, y que los sitios son parte de atractivos turísticos ofrecidos por operadores del turismo de la zona.

Otro geosito que destaca por su potencial de uso educativo respecto a los peligros geológicos es el sitio “Remoción en masa “Taco 3” del río San Pedro”, el que es relevante también por su potencial de uso turístico y los relatos históricos de 1575 y 1960. Araya et al. (2014) recopiló crónicas que evidencian la ocurrencia de un deslizamiento gatillado por el terremoto de 1575, donde la represa acumuló agua durante cinco meses, colapsando catastróficamente y cobrando la vida de miles de indígenas. Mientras que, para el terremoto de 1960, se pudo controlar el desagüe tras el arduo trabajo de paleros, impidiendo la inundación de localidades río abajo.

Los sitios “Depósitos glacialacustres del Pleistoceno en el río San Pedro” y “Rocas metasedimentarias paleozoicas de Punta Mariposa” obtuvieron un alto riesgo de degradación por actividad humana, lo que justifica la urgente necesidad de protección. Por otro lado, el geosito “Flora fosilizada del Oligoceno-Mioceno en sector Los Ulmos” se destaca por el riesgo de degradación bajo ya que está protegido por la Ley n°17.288 de Monumentos Nacionales. No obstante, y como dice Abarzúa (2023), a pesar de estar protegidos por el Estado, el patrimonio paleontológico del río San Pedro representa un bien vulnerable ante los cambios que puede producir cualquier tipo de intervención en el río. Por ello, se destaca su importancia y se aconseja que sea parte de un plan de acción de gestión del geopatrimonio en la comuna.

Cabe recalcar, que la escasa protección de las leyes chilenas hacia los recursos abióticos genera que, algunos de los geositos identificados en este trabajo, al no ser considerado como Monumento Natural, o pertenecer actualmente a alguna Reserva o Parque Nacional, peligra su conservación. Es por esto, que urgen medidas y leyes que acompañen a los geositos y sitios de geodiversidad que se están realizando a nivel nacional.

Conclusión

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, se determinaron geositos y sitios de geodiversidad de la comuna de Los Lagos que representan la intensa actividad volcánica, sísmica y los procesos coluviales, aluviales, fluviales, y glaciales de la comuna que caracterizan al territorio. Se identificaron 29 sitios de interés geológico, de los cuales, se seleccionaron 8 geositos y sitios de geodiversidad representando 6 contextos geológicos chilenos en la comuna.

Estos geositos y sitios de geodiversidad contribuyen a entender la geodiversidad existente en Los Lagos, aportando en la consolidación del turismo de la comuna y en la educación de riesgos geológicos presentes, asociados a una posible erupción del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, que es considerado parte de los centros eruptivos más productivos y activos de la SVZ (Rawson et al., 2015), y riesgos relacionados a remociones en masa producto de sismos o agentes climáticos.

Palabras Clave: geodiversidad, geositos, Los Lagos, río San Pedro, terremoto de 1960.

Financiamiento: Proyecto de Ciencia Comunitaria de la Universidad Austral de Chile, Núcleo Milenio Cyclo y proyecto Bien Público "Turismo de Montaña Los Ríos".

Agradecimientos: Agradezco el apoyo del Laboratorio Andes del Sur, a la junta de vecinos Piedras Mora, a los Ríos Tours y a la Municipalidad de Los Lagos.

Referencias:

- Abarzúa, A., Sandoval, C., Vergara-Pinto, F., Campos Medina, J., Calderón, S., Rodríguez, E. (2023). Río San Pedro Fósil: Guía paleobotánica de la selva valdiviana. Editorial Trafún.
- Araya, C., Cisternas, M., Gorioitía, N. (2013). Deslizamientos generados por el terremoto gigante de Chile de 1960 en el río San Pedro, región de Los Ríos: antecedentes históricos y datación geomorfológica de sus predecesores. In En: Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas. XXXIV Congreso Nacional y XIX Internacional de Geografía. Universidad del Bío-Bío, Chillán (pp. 24-31).
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. *Geoheritage*, Vol. 8 (2), p. 119 – 134.
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 448 p.
- Martínez, T. (2017). Propuesta preliminar para generar inventarios de sitios modificada para Proyecto Patagonia Verde.
- Morgues, F., Contreras, K., Schilling, M., Partarrieu, D. (2016). Chile. In *Patrimonio geológico y su conservación en América Latina*. (Sánchez, J. L.; Schilling, M.; Editores). Instituto de Geografía UNAM: 81-120. México.
- Morgues, F., Schilling, M., Castro, C. (2012). Propuesta de definición de los Contextos Geológicos Chilenos para la caracterización del patrimonio geológico nacional. Congreso Geológico Chileno, No. 13, Antofagasta.
- Moreno, H., Lara, L. (2007). Geología del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco: Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, 107, 1-27.
- Rawson, H., Naranjo, J. A., Smith, V. C., Fontijn, K., Pyle, D. M., Mather, T. A., Moreno, H. (2015). The frequency and magnitude of post-glacial explosive eruptions at Volcán Mocho-Choshuenco, southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 299, 103-129.
- Santos, F. (2019). Identificación, caracterización y valoración de la geodiversidad en las comunas de Futaleufú y Palena. Informe para el desarrollo turístico de Patagonia Verde: 157 p.

Identificación, caracterización y valoración de sitios de interés paleosismológico relacionados a terremotos y tsunamis del Holoceno ocurridos en la costa del sur de Chile (38°20'S-42°00'S)

Fernanda Narbona¹⁻², Manuel Enrique Schilling¹, Paulina Ditzel¹⁻², Daniel Melnick¹⁻², Ed Garrett³

(1) Instituto de Ciencias de la Tierra, Departamento de geología, Facultad de Ciencias Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja 5090000, Valdivia, Chile.

(2) Millennium Nucleus The Seismic Cycle Along Subduction Zones, Facultad de Ciencias Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja 5090000, Valdivia, Chile.

(3) Department of Environment and Geography, University of York, UK

Los sitios y elementos de la geodiversidad ayudan a comprender procesos geológicos que explican la configuración y evolución de un determinado territorio. Aquellos lugares que presentan un alto valor geocientífico son denominados geositos y conforman el patrimonio geológico. Por otra parte, Chile se caracteriza por ser afectado constantemente por sismos de gran magnitud, los cuales quedan registrados en la costa en sitios que contienen depósitos asociados a tsunamis y terremotos del pasado, tanto del registro histórico como paleosismológico. Un ejemplo es el terremoto de Valdivia de 1960, el de mayor magnitud medido por la humanidad.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar, caracterizar y valorar sitios de interés paleosismológico relacionados a terremotos y tsunamis del Holoceno ocurridos en las costas del sur de Chile, entre las regiones del Biobío y Los Lagos (38°-42°S). Para ello, se realizó un catastro de los potenciales sitios de interés paleosismológico, luego una lista final de los sitios de interés con su caracterización completa y la posterior valoración cuantitativa de cada uno de ellos. Esta última incluye sus potenciales de usos científico, educativo y turístico, además de su riesgo de degradación.

De la lista de 9 potenciales sitios de interés paleosismológico identificados, 7 fueron clasificados como geositos, los que conforman parte del patrimonio paleosismológico. El mayor puntaje para el valor científico fue obtenido en Cocotué, Maullín, Chucalén, Tirúa y Queule; mientras que para la isla Mancera se obtuvo el menor puntaje.

La cuantificación del riesgo de degradación de estos geositos va de moderada a alta, ninguna es baja. Son sitios con tendencia a sufrir daños importantes por actividades humanas y/o del propio ambiente en el que se desarrollan. Esto hace necesaria la implementación de políticas públicas de conservación para su gestión, uso adecuado y promover buenas prácticas a través de actividades educativas y/o turísticas.

Los sitios identificados de interés paleosismológico en las costas del centro-sur de Chile poseen un alto potencial de uso en el área científica, turística y educativa. Son sitios idóneos para la difusión de las ciencias de la Tierra y para contribuir al desarrollo de manera sustentable de las comunidades locales. Además, son excelentes ilustradores del riesgo asociado a terremotos y tsunamis a lo largo de las costas de Chile.

Keywords: Paleoseismic heritage sites; Holocene; megathrust earthquakes; tsunamis; south-central Chile.

Palabras Clave: paleosismología, patrimonio, holoceno, terremotos, tsunamis.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por el Núcleo Milenio CYCLO "El Ciclo Sísmico en Zonas de Subducción", apoyado por la Iniciativa Científica Milenio (ICM) del Gobierno de Chile (NC160025).

Agradecimientos: Investigadores Lisa Ely, Tina Dura, Pedro Matos y Marco Cisternas. Agradecemos a Tomas Martínez, Valentina Moreno y Cristóbal Villagrán que apoyaron el trabajo de campo.

Referencias:

- Aedo et al (2021) Origen y distribución de depósitos de tsunami en la marisma de Chaihuín, Chile. *Andean Geology* 48 (1): 125-152.
- Alvarez-Marrón J, Hetzel R, Niedermann S, Menéndez R, Marquínez J (2008) Origin, structure, and exposure history of a wave-cut platform more than 1 Ma in age at the coast of northern Spain: A multiple cosmogenic nuclide approach. *Geomorphology* 93:316-334. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.005>
- Angermann D, Klotz J, Reigber C (1999) Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters* 171(3):329-334. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00173-9)
- Antinao JL, Duhart P, Clayton J, Elgueta S, McDonough M (2000) Área de Ancud-Maullín, Región de Los Lagos. Escala 1: 100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

Quebrada de Pinte, un oasis de geodiversidad y una escuela para futuros/as profesionales

Nicolás Oyarzún¹, Daniel Melnick¹, Carolina Peña¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

La Quebrada Pinte, ubicada al este de la comuna de Alto del Carmen en la región de Atacama, es una localidad morfoestructuralmente ubicada en la Cordillera Frontal que ha sido, durante los últimos 5 años, una escuela de campo para estudiantes de Geología de la Universidad Austral de Chile, y durante décadas antes también de otras universidades.

Su amplio, diverso y bien preservado patrimonio geológico en un área acotada de ~70 km² y fácil acceso convierten a la Quebrada Pinte en una academia de excelencia para las distintas disciplinas de la geociencia. Los excelentes afloramientos de diversas rocas metamórficas (migmatitas, esquistos y milonitas), estructuras de piel gruesa (falla Pinte) y piel fina, fósiles marinos de la Formación Lautaro, y vestigios de un aluvión ocurrido en el año 2015, permiten enseñar muchas subdisciplinas de la geología incluyendo la petrología sedimentaria, ígnea y metamórfica, geología estructural dúctil y frágil, paleontología, hidrogeología, peligros naturales, disciplinas fundamentales para el desarrollo y formación de futuros y futuras profesionales del área de la geología.

La Quebrada Pinte como los alrededores de la comuna de Alto del Carmen, han sido objeto de estudio científico de diversas/os autores/as durante las últimas 4 décadas, cuyos trabajos buscan, entre otros tópicos, reconocer evidencias que permitan refinar la reconstrucción del ensamblaje de Gondwana en su borde occidental durante el Paleozoico, identificar sitios que evidencien el magmatismo asociado a la extensión cortical a escala regional desarrollada durante el Triásico, y establecer los límites de las rocas asociadas a un ciclo de transgresión-regresión marina ocurrida durante el desarrollo de una cuenca de trasarco en el Jurásico Inferior. A pesar de la profundidad de los trabajos científicos realizados en el área, cada año que visitamos la Quebrada Pinte, realizamos nuevos hallazgos científicos y pedagógicos en las diferentes disciplinas de la geociencia, que complementan los estudios científicos realizados en los últimos años, o bien, abren un nuevo foco de discusión científica y se transforman, a menudo, en nuevos puntos de interés y visita obligatoria para los siguientes cursos de estudiantes a quienes les corresponde visitar el área durante los cursos de campo.

La Quebrada Pinte se presenta como un lugar idóneo para el aprendizaje cultural local y ancestral de la región de Atacama, así como para el desarrollo de relaciones con las comunidades indígenas diaguitas y huascoatinas, quienes en cada ocasión de visita, nos entregan su visión y conocimiento sobre el patrimonio cultural y geológico, resaltando la importancia del cuidado y la preservación, así como su interés por desarrollar un turismo sustentable para quienes buscan contemplar este oasis de la geodiversidad y patrimonio cultural.

Palabras Clave: Geodiversidad, Patrimonio geológico, Escuela de campo, Comunidades diaguitas.

Referencias:

- Álvarez, J., Mpodozis, C., Arriagada, C., Astini, R., Morata, D., Salazar, E., Valencia, V., Vervoort, J., 2011. Detrital zircons from late Paleozoic accretionary complexes in north-central Chile (28°-32°S): possible fingerprints of the Chilenia terrane. *Journal of South American Earth Sciences* 32, 460-476.
- Salazar, E., Coloma, F., & Creixell, C. (2013). Geología Del Área El Tránsito-Lagunillas, III Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 149: 106p. 1 mapa escala 1:100.000.
- Murillo, I., Álvarez, J., Montecinos, P., Creixell, C., Salazar, E., & Arriagada, C. (2013). Geochronology and kinematics of El Portillo Mylonites: relation with San Rafael Orogeny and Middle Triassic extension in north-central Chile. *Bolletino di Geofisica teorica ed applicata*, 54, 82.
- Salazar, E. (2012). Evolución Tectonoestratigráfica de la Cordillera de Vallenar: Implicancias en la construcción del Oroclino de Vallenar. MSc Thesis. Universidad de Chile.

Geo¿Patrimonio? Discusiones metodológicas sobre la construcción social del patrimonio geológico en el proyecto Geoparque Pillanmapu

Rodrigo Pérez Garay¹, Emil Stefani Signorio¹

(1) Fundación Geoparque Pillanmapu, 16 Sur 542, San Andrés, Talca, Chile

Históricamente, la concepción y establecimiento de criterios a partir de los cuales se define una expresión -sea natural o cultural- como patrimonio, ha respondido a lógicas hegemónicas, donde las designaciones son realizadas por grupos expertos, generalmente, vinculados a estamentos institucionales en espacios de poder (Prats, 2000). No obstante, en las últimas décadas, el discurso instaurado sobre los procesos de concepción del patrimonio ha modificado el paradigma sobre cuando una expresión de la naturaleza indómita, del pasado o de la genialidad humana, es efectivamente considerada patrimonio. Ciertos autores (Prats, 2005; Escalera y Guerrero, 2019) consideran que un referente con potencial de concebirse como patrimonio responde a procesos de patrimonialización, el cual consta de la puesta en valor y la activación patrimonial, donde esta última se relaciona principalmente con el discurso generado en torno al elemento patrimonial, el cual no es carente de una carga social e ideológica, sostenida por la memoria e identidad de una comunidad. Así, para este autor el patrimonio debe ser concebido como una construcción social, tal que la legitime las expresiones patrimoniales por parte de la comunidad. En este sentido, transformar lo que es importante para la comunidad en patrimonialmente relevante, constituye una de las herramientas más eficaces de conservación.

En el caso del patrimonio geológico, su concepción no debe establecerse ajena a la discusión sobre su carácter patrimonial desde la perspectiva de la construcción social, pues si bien se compone de aquellos elementos de la geodiversidad que son de valor y reflejan parte de la memoria e identidad de la Tierra, su legitimación por parte de las comunidades establece desafíos para la correcta gestión, puesta en valor y salvaguardia desde enfoques participativos *Bottom up*, o de abajo hacia arriba, impulsados cada vez con más fuerza desde la Red de Geoparques Mundiales de la UNESCO.

Ante las discusiones sobre la concepción del patrimonio, el proyecto Geoparque Pillanmapu se encuentra desarrollando una propuesta metodológica que fomente el proceso de construcción social del patrimonio geológico de los Andes del Maule, a través de la inclusión de las comunidades en el desarrollo del inventario de geosítios y lugares de la geodiversidad presente en los Andes del Maule. Así, la propuesta que se encuentra actualmente en etapa de validación, contempla la perspectiva de construcción social durante las diversas fases del proceso de identificación, evaluación y validación: 1) Identificación de elementos de la geodiversidad patrimonializables, donde a través de cartografías participativas se realzan aquellos referentes que son considerados relevantes y, por ende, valiosos para la comunidad, 2) Caracterización de hitos, mediante estudio de campo con participación de actores clave, 3) Evaluación cuantitativa de los lugares de interés, integrando metodologías de evaluación del paisaje para redefinir el indicador de "Belleza, espectacularidad o estética", ampliamente utilizado en metodologías a nivel nacional e internacional, 4) Legitimación de resultados a partir de mesas de trabajo participativas, y 5) Transferencia de resultados. La presente propuesta metodológica busca establecer un modelo replicable a nivel nacional e internacional que aporte a la discusión sobre cómo concebimos el patrimonio geológico, cómo logramos que forme parte de la memoria e identidad del territorio desde una perspectiva integral y participativa, y cómo nos aproximamos a una construcción social que valide su carácter patrimonial, constituyendo la base para una geoconservación efectiva.

Palabras Clave: Geoparque, Patrimonio Geológico, Construcción social del patrimonio, Participación ciudadana

Financiamiento: Financiado por Fundación Geoparque Pillanmapu

Referencias:

- Escalera, J., Guerrero, M.J. (2019). Conflictos y oportunidades de la participación ciudadana en procesos de patrimonialización local: estudio de casos en España y Chile. Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural, 32(2). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.apc32-2.copc>.
- Prats, L. (2000). El concepto de patrimonio cultural. Cuadernos de antropología social, (11), 115-136.
- Prats, L. (2005). Concepto y gestión del patrimonio local. Cuadernos de antropología social, (21), 17-35. <https://doi.org/10.34096/cas.i21.4464>.

Proyecto Geoparque Pillanmapu: Actualización sobre avances y desafíos para su reconocimiento como Geoparque Mundial de la UNESCO

Rodrigo Pérez Garay¹, Emil Stefani Signorio¹

(1) Fundación Geoparque Pillanmapu, 16 Sur 542, San Andrés, Talca, Chile

La cordillera de los Andes de la región del Maule comprende un territorio que desde mediados del siglo XX ha sido utilizado para la industria energética y silvoagropecuaria, pero en la última década ha adquirido relevancia el rubro del turismo como actividad económica. Lamentablemente, esta explosión turística ha exhibido una dicotomía en su implementación. Por una parte, el geoturismo puede significar una nueva oportunidad de trabajo para las comunidades locales, a la vez que se fomenta la gestión sostenible del patrimonio, en particular, el patrimonio geológico. Mientras que, por otra parte, la falta de gestión turística de un territorio puede significar un fuerte impacto en sobre los elementos patrimoniales y el modo de vida de las comunidades locales. En este contexto, la iniciativa Geoparque Pillanmapu surge en 2019 con el objeto de consolidar un Geoparque Mundial UNESCO en 6 municipios cordilleranos del Maule, fomentando el desarrollo sostenible a través de la puesta en valor y la salvaguardia del patrimonio, tanto natural como cultural.

En los inicios del proyecto, las acciones desarrolladas se centraron en la identificación del tejido social, recogiendo la percepción de la comunidad local frente a este nuevo modelo de gestión. En los siguientes años, el principal eje de trabajo fue trabajar la articulación de actores, lo que se fue consolidando a través de programas como la "Red de Amigos del Geoparque" y los "Embajadores del Geoparque", integrados por el sector privado productivo vinculado al turismo y organizaciones de la sociedad civil. Por otra parte, el trabajo con el sector público a nivel regional ha impulsado la firma de convenios estratégicos con la Corporación Regional de Desarrollo Productivo del Maule (CRDP Maule), la cual es dependiente directamente del Gobierno Regional del Maule. A través de esta entidad la Fundación se adjudicó un Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) para desarrollar un estudio que sienta las bases para consagrar un geoparque en los Andes del Maule, siendo así un aliado estratégico para el financiamiento y el fortalecimiento de la gobernanza desde la dimensión pública. Respecto al sector público local, la Fundación ha firmado convenio con la Ilustre Municipalidad de San Clemente, a través del cual se fomenta la asociatividad a escala territorial para el desarrollo de iniciativas conjuntas, tales como la confección de guías geoturísticas. El último estamento del modelo de gobernanza lo comprende la Academia, la cual juega un rol importante en los modelos de Geoparques Mundiales de la UNESCO, pues estos estamentos poseen participación en el Comité Científico y, en el caso del proyecto Geoparque Pillanmapu, este es presidido por la carrera de geología de la Universidad Católica del Maule (UCM).

Como se mencionó previamente, la Fundación Geoparque Pillanmapu se encuentra desarrollando un estudio que busca: 1) establecer el modelo de gobernanza idóneo en función de las interrelaciones de los actores territoriales, 2) desarrollar el inventario patrimonial, natural y cultural del Geoparque Pillanmapu, y 3) transferir resultados para actores clave del turismo y el sector público. En lo que respecta al inventario patrimonial, los resultados preliminares indican la presencia de un total de 340 expresiones naturales y culturales patrimonializables. El 44 % de los hitos de relevancia corresponden a elementos de la geodiversidad de diversa génesis y que presentan algún grado de interés científico, educativo y/o turístico. Estos hitos geológicos serán sometidos a la metodología de evaluación cuantitativa desarrollada para el Geoparque Pillanmapu, la cual integra la percepción de las comunidades en torno al valor escénico de los lugares. Además de los elementos geológicos, se suman más de 400 especies de flora asociada a los sitios de la geodiversidad catastrados, además de 30 referentes del patrimonio cultural inmaterial y 50 expresiones del patrimonio cultural material.

En base a los alcances del FNDR, se proyecta que luego de este fondo el proyecto contará con un alto porcentaje de los criterios requeridos para la postulación a la Red Mundial de Geoparques de la UNESCO. Se encuentra en formulación el proyecto de continuidad, el que se basará en: 1) Habilitación de instalaciones para la puesta en valor y salvaguardia del Geopatrimonio, 2) Transferencia de capacidades, a través de capacitaciones a guías locales para la actividad geoturística y programas de geoeducación, y 3) Programa de vinculación y gestión integrada, con el objeto de consolidar la gobernanza y la geoconservación desde la acción ciudadana. De esta manera, se planifica que para el periodo 2024 - 2025 se envíe el expediente de solicitud para consagrar en los Andes del Maule un Geoparque Mundial de la UNESCO.

Palabras Clave: Patrimonio Geológico, Geoconservación, Geoturismo, Geoeducación, Proyecto Geoparque Pillanmapu.

Financiamiento: Financiado por Corporación Regional de Desarrollo Productivo del Maule, a través de FNDR del Gobierno Regional del Maule.

Agradecimientos: A la Corporación Regional de Desarrollo Productivo del Maule, la cual ha apoyado la iniciativa Geoparque Pillanmapu desde etapas tempranas.

Hallazgo de sitio geológico de una colada de lava “inmiscible” en la Formación Lupica con potencial de geositio, Altiplano del norte de Chile

Edmundo Polanco Valenzuela¹, Rodrigo Arcos Rojas¹, Edwin González Abarca¹, Jorge Muñoz Bravo², Estanislao Godoy Pirzio-Biroli³, Paola Martínez Escobar⁴

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Avenida Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) SERNAGEOMIN, Comité Editor, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(3) Av. Virginia Subercaseaux 4100, Pirque, Santiago

(4) SERNAGEOMIN, Departamento de Laboratorios, Til Til 1993, Nuiña, Santiago

En la última campaña de terreno del levantamiento geológico de la Carta Codpa del Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), se reconoció en la Formación Lupica (Montecinos, 1963; García *et al.*, García; Arcos *et al.*, 2018) en la quebrada homónima, un pequeño afloramiento de roca que presentaba dos fases: una “roca de caja” de color pardo pálido (fase 1) e inmersa en la anterior a tubos o cilindros alargados (o oblatos) pero también esferas y elipsoides de color negro (fase 2). Este afloramiento de unos 3 metros de potencia se encuentra entre una sucesión de tobas líticas brechosas. Una primera y simple interpretación era que estos tubos “máficos” eran alimentadores desde la zona de acumulación hacia la superficie, no obstante, la disposición de la secuencia (prácticamente vertical) modificaron la idea inicial y, la explicación más simple es que corresponde un flujo de lava con dos fases claramente definidas (inmiscible). Dado lo singular e interesante de este afloramiento, parece evidente proponerlo y destacarlo como un potencial geositio. En este sentido, se recolectaron muestras de roca de ambas fases para elaborar cortes transparentes y pulidos, y realizar análisis químicos de roca total en el Departamento de Laboratorios de SERNAGEOMIN. De esta manera, materializar estudios petrográficos y análisis químicos de minerales mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) y, caracterizar ambas fases e intentar proponer algunas hipótesis sobre su origen. En el presente trabajo se expone la descripción de las fases de esta singular colada de lava y los principales resultados analíticos obtenidos preliminarmente y se esbozan algunas ideas sobre su origen.

El afloramiento se expone en las facies de tobas de líticas brechosas con pómez de la Formación Lupica localizada en la quebrada homónima entre edades de $19,3 \pm 0,6$ y $18,6 \pm 0,6$ Ma (K-Ar en biotita y roca total; García *et al.*, 2004). Entre estas tobas se expone un afloramiento de una colada de lava andesítica maciza de una potencia de unos 3 m con dos fases claramente definidas (inmiscible: color negro y pardo pálido, respectivamente). Litológicamente corresponde a una andesita porfírica de plagioclasa, piroxeno y óxidos Fe-Ti en una masa fundamental con textura intersertal con microlitos de plagioclasa y microcristales de piroxeno y óxidos de Fe-Ti y, vidrio intersticial de color pardo pálido a incoloro en la fase 1 y pardo oscuro en la fase 2. Además, una característica singular es la presencia de borde de la fase 2 constituido por óxidos de Fe-Ti (ilmenita-magnetita) que tiene propiedades magnéticas.

Se midieron 50 puntos en el corte pulido con película de carbono mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) ZEISS EVO MA-10, Oxford detector EDS Ultim Max 40 para la clasificación de minerales (plagioclasa-piroxeno-óxidos de Fe-Ti) y la determinación de la composición del vidrio intersticial de la masa fundamental.

Los resultados preliminares de la composición del vidrio de la fase 1 y fase 2 (tubos) indica que ambas fases son cogenéticas pero con una disminución del contenido de K₂O a medida que aumenta la sílice, lo que, es bastante raro y contrario a lo esperado, dado que el vidrio de la fase 1 (tubos y esferulitas de color negro) es menos evolucionada que el de la fase 2 (78-80 y 85-98% en peso de SiO₂, respectivamente).

Algunas de las ideas que se pueden esbozar a partir de la petrografía y texturas reconocidas y los resultados preliminares es fases inmiscibles se originan a partir de un mismo magma donde la fase 1 es sorpresivamente de mayor temperatura (aunque no mucho más) contrario a lo esperado donde la mayor vesicularidad y menor densidad esperada era en la fase 1 (“roca de caja”). Además, lo nítido de los bordes indica que ambos estuvieron en estado dúctil al momento de la separación.

Palabras Clave: colada de lava, inmiscible, tubos, esferulitas, dos fases.

Financiamiento: Este estudio fue realizado en el marco del Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Agradecimientos: Este trabajo corresponde a una contribución con el patrocinio de la Subdirección Nacional de Geología de SERNAGEOMIN.

Patrimonios Líticos del Desierto de Atacama: hacia la construcción transdisciplinar de una Litoteca Geoarqueológica

Omara Reyes¹, Millarca Valenzuela¹, Valentina Figueroa², Lautaro Núñez²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Angamos #0610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo, Calle Tebenquín S/N, San Pedro de Atacama, Chile

Los primeros habitantes del Norte Grande decidieron instalarse en torno a los recursos de la alta Puna y las cuencas del Loa y Atacama hacia finales del Pleistoceno [3, 5]. En este sentido, la Cuenca de Atacama se convirtió en un área de convergencia de diversos grupos de cazadores-recolectores, encontrándose actualmente sitios arqueológicos del Periodo Arcaico (Holoceno Temprano) donde se han documentado distintos tipos de artefactos líticos datados entre los 10.100 y 9.800 años antes del presente [3, 4]. El análisis petrográfico de los artefactos líticos es un aporte para la reconstrucción de las rutas de movilidad e intercambio utilizadas en el pasado [7].

Este trabajo busca presentar los alcances de la caracterización petrográfica, utilizando microscopía óptica y electrónica para la correlación de materias primas líticas con sus fuentes de aprovisionamiento, en vistas de la generación de una litoteca geoarqueológica de los primeros habitantes de la vertiente occidental de la Puna de Atacama, en los sectores delimitados por las Hojas Toconao [6] y Río Zapaleri [1]. Para esto, se analizaron 10 muestras de materias primas seleccionadas por arqueólogas y arqueólogos del Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo R.P. Gustavo Le Paige s.j. (IIAM-UCN), que se distribuyen en 6 sitios diferentes comprendidos entre la Depresión Preandina y la Puna en el sector antes expuesto. Estos sitios han sido nombrados en el presente trabajo en función de elementos geológicos característicos de cada sitio y corresponden a los siguientes: sector Quebrada Zapar, sector Cerros de Cas, sector Tulán, sector Cordón de Tujle, sector Tuyajto, sector Láscar y sector Tara. Las muestras analizadas corresponden tanto a rocas ígneas extrusivas (vítreas y cristalinas), como a rocas sedimentarias. La totalidad de ellas fueron caracterizadas utilizando microscopía óptica y 5 de ellas fueron complementadas con el uso de microscopía electrónica para describir la morfología de los microlitos presentes en rocas tipo obsidiana (4 muestras) y esclarecer su clasificación utilizando un diagrama de clasificación geoquímica (1 muestra). Estas caracterizaciones fueron comparadas con las descripciones petrográficas de las unidades litológicas presentes en los sitios estudiados, las cuales fueron consultadas en bibliografía, presentándose como una etapa inicial de generación de enlaces.

Los resultados indican que utilizando esta metodología es posible sugerir y, en algunos casos, determinar las fuentes de materia prima de las muestras que corresponden a rocas sedimentarias e ígneas cristalinas, considerando su forma, petrografía y punto de extracción. Mientras que, para las muestras vítreas (obsidianas), si bien se pueden caracterizar de forma exhaustiva utilizando microscopía óptica y electrónica para describir sus microlitos, no es posible determinar su fuente de aprovisionamiento debido a la ausencia de caracterizaciones petrográficas detalladas, en la bibliografía actual, sobre de las obsidianas presentes en las unidades volcánicas de los sitios. Frente a ello, se propone el uso de microscopía electrónica para generar una base de datos de descripciones morfológicas y composicionales de microlitos en obsidianas, que sirvan para establecer en un futuro la proveniencia de este tipo de materia prima.

En definitiva, una litoteca geoarqueológica es una herramienta patrimonial relevante, ya que permite el estudio y la organización de muestras líticas con valor arqueológico, actuando como material documental de consulta para investigación y educación. Por consiguiente, es importante destacar la relevancia de estudiar e incluir las fuentes de aprovisionamiento como sitios protegidos para resguardar su valor cultural. Los sitios estudiados en este trabajo, que fueron fuentes de recursos explotados por sociedades del pasado, son lugares frágiles que han logrado ser protegidos gracias al cuidado territorial de las Comunidades Lickanantay.

Palabras Clave: Litoteca, Geoarqueología, Petrografía, SEM, Materias primas líticas.

Financiamiento: En primer lugar, agradecer a la Comunidad Atacameña de Toconao y a la Comunidad Atacameña de Socaire por colaborar en esta investigación que se sitúa en sus territorios. Agradecer particularmente al proyecto FONDECYT REGULAR N°1201603 que financió este trabajo y, a su vez, al proyecto PRIPODA por la posibilidad de contribuir a la construcción de una litoteca de recursos líticos geo-arqueológicos explotados en la cuenca del Salar de Atacama. Agradecer finalmente a la Unidad de Equipamiento Científico, MAINI® por su contribución de análisis mediante FE-SEM SU5000-MAINI® 2018.

Referencias:

- [1] Gardeweg, M. & Ramírez, C. (1985). Hoja Río Zapaleri, Región de Antofagasta. Escala 1:250.000. Sernageomin, Carta No. 66.
- [2] Loyola, R., Figueroa, V., Núñez, L., Vásquez, M., Espíndola, C., Valenzuela, M. & Prieto, M. (2022). The volcanic landscapes of the ancient hunter-gatherers of the Atacama Desert through their lithic remains. *Frontiers*.
- [3] Núñez, L. (2010). Primeros poblamientos del desierto de Atacama. En *Región de Antofagasta: pasado, presente y futuro*, 28-41.
- [4] Núñez, L., Grosjean, M. & Cartajena, I. (2005). Ocupaciones humanas y paleoambientes en la Puna de Atacama. San Pedro de Atacama: Universidad Católica del Norte - Taraxacum.
- [5] Núñez, L., Jackson, D., Dillehay, T., Calogero, S. & Méndez, C. (2016). Cazadores recolectores tempranos y los primeros poblamientos en Chile hacia finales del Pleistoceno (ca. 13.000-10.000 años a.p.). En *Prehistoria en Chile desde sus primeros habitantes hasta los incas*, 71-119. Editorial Universitaria.
- [6] Ramírez, C. & Gardeweg, M. (1982). Hoja Toconao, Región de Antofagasta. Escala 1:250.000. Sernageomin, Carta No. 54.
- [7] Ramírez, J. (2019). Estudios de geoarqueología en el estrecho de Gibraltar: elaboración del catálogo de la litoteca geoarqueológica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 21, 11-28.

Caracterización petrográfica de materias primas líticas utilizadas por cazadores-recolectores circumpuneños del arcaico temprano en el Desierto de Atacama

Francisco Rosas Bustos¹, Millarca Valenzuela¹, Valentina Figueroa², Lautaro Núñez²

(1) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Av. Angamos 610, Antofagasta, Chile

(2) Universidad Católica del Norte, Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo, San Pedro de Atacama, Chile

El paisaje geopatrimonial del Desierto de Atacama a finales del Pleistoceno fué afectado por eventos fluviales de gran escala en la Alta Cordillera, favoreciendo el desarrollo del paisaje en la Alta Puna y en las quebradas y cuencas precordilleranas, formando ambientes prósperos en recursos bióticos y en consecuencia, los primeros asentamientos humanos. Las primeras poblaciones utilizaron los recursos abióticos que otorga el área circumpuneña de Atacama para la elaboración de herramientas líticas, desarrollándose como una sociedad cazadora-recolectora [1][2]. En consecuencia, las herramientas líticas son objeto de gran interés geoarqueológico y patrimonial, pues entrega información sobre la movilidad y comportamientos culturales, a través de estudios de distribución y procedencia [3][4].

Este trabajo tiene como objetivo hacer la caracterización petrográfica y una aproximación a las procedencias de materias primas líticas utilizadas por los cazadores-recolectores circumpuneños de Atacama del Arcaico Temprano, específicamente entre la cordillera de Domeyko y la Cuenca del Salar de Atacama. Se estudiaron 11 muestras otorgadas por el equipo del Instituto de Investigaciones Arqueológicas y Museo R.P Gustavo Le Paige s.j (IIAM), asociadas a sitios arqueológicos del Arcaico. Para la caracterización de las muestras se emplearon métodos petrográficos de escala macro y microscópica, y el uso de técnicas analíticas como la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) y Difracción de Rayos X (DRX) para aquellas muestras que requerían una exhaustiva clasificación de fases minerales y composición.

Los resultados indican que en los sitios del Arcaico Temprano utilizaron rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas dacíticas, además de obsidias, rocas sedimentarias continentales como areniscas, lutitas, y rocas sedimentarias diagenéticas (sílex). Al comparar la mineralogía con la información bibliográfica disponible, fue posible estimar la procedencia de las fuentes de aprovisionamiento de la gran mayoría de las muestras. En efecto, las rocas sedimentarias continentales provienen de la Fm. Tuina [5] [6]; las rocas silíceas sugieren como posibles procedencias la Fm. Lasana y/o Fm. Opache [7]; las rocas piroclásticas presentan estructuras y mineralogía característica de la Ignimbrita Sifón [8] y de la Fm. Chiquinaputo [7]; y el aprovisionamiento de rocas andesíticas tendrían lugar en las Coladas de lava del Pleistoceno [6][9] y los Volcanes del Mioceno [9].

El estudio de materias primas mediante la petrología es eficiente para estimar la procedencia de rocas sin una alteración que impida observar las estructuras y mineralogía primaria, por lo que se sugiere aumentar el tamaño de muestreo para una mayor precisión en los resultados. Por otro lado, en rocas silíceas y obsidias la petrología puede llegar a ser una herramienta limitada, por lo que el uso de técnicas analíticas facilita la caracterización y además, se recomienda el uso de métodos geoquímicos para una mayor efectividad en el conocimiento acerca de los procesos que originan estas particulares rocas y converger en la procedencia de estas.

Se espera que los resultados obtenidos sean útiles como base de datos para próximos proyectos geoarqueológicos velen por el patrimonio del Desierto de Atacama.

Palabras Clave: Cazadores-Recolectores, Desierto de Atacama, Procedencia, Caracterización petrográfica, Materias primas líticas.

Agradecimientos: Gracias a la Comunidad Atacameña de Toconao y Comunidad Atacameña de Socaire, Fondecyt Regular N°1201603 y PRIPODA, a la Unidad de Equipamiento Científico MAINI®-UCN y al aporte de R. Loyola y O. Reyes.

Referencias:

- [1] Núñez, L. (1983). Paleindian and archaic cultural periods in the arid and semiarid regions of Northern Chile. *Advances in World Archaeology* II, 161-202.
- [2] Núñez, L., Grosjean, M., & Cartajena, I. (2005). Ocupaciones Humanas y Paleoambientes en la Puna de Atacama. San Pedro de Atacama, Chile: Universidad Católica del Norte - Taraxacum.
- [3] Martínez, M. M. (1995). Procesos técnicos y variabilidad en la industria lítica del Pleistoceno Medio de la meseta: Sierra de Atapuerca, Torralba, Ambrona y Áridos. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Prehistoria y Etnología, Madrid.
- [4] Mangado, J. (2002). La caracterización y el aprovisionamiento de los recursos abióticos en la Prehistoria de Cataluña: las materias primas silíceas del Paleolítico Superior Final y el Epipaleolítico. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona., Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, Barcelona.
- [5] Rackzyński, A. (1963). Geología del distrito minero de Tuina. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- [6] Henríquez, S., Becerra, J., & Arriagada, C. (2014). Geología del Área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. 171:111.
- [7] May, G., Hartley, A., Chong, G., Stuart, F., Turner, P., & Kape, S. (2005). Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, 32(1), 33-58.
- [8] Guest, J. (1969). Upper Tertiary Ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta Province, Northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 80, 337-362.
- [9] MARINOVIC, N., & LAHSEN, A. (1984). Hoja Calama, Región de Antofagasta, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica, escala 1:250.000. Santiago, Chile.

Evaluación de la geodiversidad y el patrimonio geológico de las montañas de la Región de Los Ríos para promover el geoturismo en los Andes del sur de Chile

Manuel Enrique Schilling Danyau¹, **Felipe Santos**², José Joaquín Lagos², Valentina Muñoz², Nicolás Espinoza², Maya Soto², Paulino Arredondo², Claudia Pichincura³, Ignacia Faúndez², Gabriel Moreno², Camila Garcés²

(1) Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile
(2) Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile
(3) Departamento de Geología, Universidad de Concepción

La geodiversidad corresponde a los distintos elementos geológicos presentes en un territorio, los que evidencian su historia geológica particular. En las montañas de la Región de Los Ríos se registran procesos geológicos ocurridos durante los últimos 350 millones de años. Entre los elementos geológicos más destacados se sitúan los volcanes activos Villarrica, Quetrupillán, Mocho-Choshuencho, Puyehue - Cordón Caulle, y el grupo volcánico Carrán - Los Venados. Dentro de los eventos geológicos históricos más relevantes destaca el terremoto de Valdivia de 1960, el más grande medido por la humanidad con una magnitud de 9,5 Mw. Este evento sísmico causó remociones en masa en el río San Pedro que represaron sus aguas y las del lago Riñihue, evento conocido como "Riñihueazo". Dicho terremoto, también produjo la erupción del complejo volcánico Puyehue - Cordón Caulle que comenzó solo 2 días después del gran sismo. Este volcán también hizo erupciones los años 1921 y 2011. El grupo volcánico Carrán - Los Venados registra tres erupciones durante el siglo XX (1906, 1955, 1979), y el volcán Villarrica es considerado el de mayor riesgo a nivel nacional por su alta actividad y la gran cantidad de población que habita alrededor. Respecto al registro paleontológico, en la región destacan los fósiles de hojas del Triásico de la formación Tralcán que aflora en el cerro homónimo. Para el Oligoceno-Mioceno, se registran fósiles de hojas en los estratos del Río San Pedro y en los estratos de Pitreño, y fósiles de invertebrados marinos en la ribera del Lago Ranco.

En el marco del proyecto "Turismo de Montaña Los Ríos", realizamos una evaluación de la geodiversidad y el patrimonio geológico de las comunas Panguipulli, Los Lagos, Futrono, Lago Ranco y Río Bueno, con la finalidad de promover actividades turísticas y educativas relacionadas con las ciencias de la Tierra. Esta evaluación ha permitido reconocer más de 100 sitios de geodiversidad que representan una amplia variedad de contextos geológicos chilenos. Varios sitios de interés geológico evaluados presentan un alto potencial de uso turístico, educativo, y científico, y un riesgo de degradación variable que está asociado principalmente al desarrollo de actividades económicas de impacto ambiental, y a las condiciones geológicas y climáticas extremas de las zonas de montaña. La conservación y uso sustentable de estos sitios permitirán promover el desarrollo de comunidades locales a través del geoturismo, la conservación de la naturaleza, y la educación, contribuyendo en particular a la reducción del riesgo de desastres naturales.

Palabras Clave: Geodiversidad, Patrimonio Geológico, Geoturismo, Región de los Ríos, Andes del Sur de Chile.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Regional de los Ríos y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) a través del proyecto Geoparque Región de Los Ríos (21BPA - 190493). Además, ha recibido financiamiento de parte del Laboratorio Natural Andes del Sur de Chile y del Núcleo Milenio CYCLO.

Taitao Ophiolite (Aysen Region, southern Chile): an exceptional site for the study of young suboceanic lithosphere (~6 Ma) and the subduction process of an active ridge under continental crust

Manuel Enrique Schilling Danyau¹, Eugenio Andrés Veloso Espinoza², Gaëlle Plissart¹, Luis Enrique Lara Pulgar¹, Alexandre Corgne¹, Pablo Sánchez-Alfaro¹

(1) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

(2) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Departamento de Ingeniería y Geotécnica, Valparaíso, Chile

Ophiolites are fragments of oceanic lithosphere emplaced in continental crust that have high scientific value because they contribute significant information to understand processes related to the formation of oceanic crust at mid-ocean ridges and back-arc settings. Ophiolites permits the study of the structural and geochemical characteristics of modern and ancient oceanic lithosphere, the crust-mantle processes, the genesis and evolution of magmas, and the melt-rock interaction.

Taitao ophiolite is located near the Chilean Triple Junction in the Aysen Region and displays a complete ophiolitic sequence, including from base to top, mantle peridotites, gabbros, a sheeted dyke complex and pillow lavas with sediments. The Taitao ophiolite was emplaced onto the continent as a result of the Chile Ridge collision at ca. 6 Ma and allows detailed chemical, isotopic and structural study of rocks that were recently extracted from the suboceanic mantle. Moreover, the Chile Triple Junction (CTJ) is the only place on Earth where an active ridge is being consumed beneath a continental plate and thus might serve as an analogue for similar past events worldwide. Subduction of a spreading ridge would lead to indenter tectonics with formation of a forearc sliver and regional-scale geomorphological features. It would also imply a complete reconfiguration of the subduction zone, including its thermal architecture, which in turn should have consequences on a wide range of processes. For instance, the subsequent development of slab windows has been proposed to explain the gap in the volcanic arc, the special geochemical signature of arc magmas and the rare occurrence of forearc magmatism. Finally, hydrothermal sources induced by the thermal anomaly host specific biological communities.

Taitao ophiolite is located in an area of very difficult access, inside the National Park (NP) Laguna San Rafael (17,420 km²) that was created in 1959, close to the Northern Patagonia Ice field, one of the most important continental water reservoirs in the world. In 1979, this NP was recognized as a UNESCO Biosphere Reserve. In contrast, its geodiversity and geological heritage known worldwide by the geoscientific community, is not valued by local communities and the Chilean society. Among the most relevant sites related to the Taitao ophiolite are outcrops of: pillow lavas covered by marine sediments; sheeted dike complex; isotropic and layered gabbros; pseudo-stratified ultramafic sequence composed by harzburgites, lherzolites, dunites, and clinopyroxenites representative of the mantle-crust transition zone (Moho); harzburgite and lherzolite with dunite channels and pyroxenite layers frequently cut by late pegmatitic gabbro and diabase dykes; and strongly mylonitized ultramafic and mafic rocks (tectonites) in the contact zone with the Cabo Raper pluton at the base of the ophiolite. Additionally, there are other plutonic and volcanic units related to the emplacement of the ophiolite and the magmatic activity caused by the Chile ridge subduction during the upper Miocene and Pliocene such as: five Taitao granites; the Main Volcanic Unit; and the Chile Margin Unit. Finally, in the Taitao peninsula are located the westernmost hot springs of the country generated by the subduction of the Chilean ridge. In this study we highlight the scientific value of the Taitao ophiolite and the surrounding areas, which exhibit exceptional opportunities to study the young suboceanic lithosphere (~6 Ma) and the subduction process of an active ridge under continental crust.

Palabras Clave: Taitao ophiolite, Suboceanic lithosphere, active ridge subduction, High scientific value.

Financiamiento: This work was financed by project Fondecyt Regular 1211820.

Geodiversidad y patrimonio geológico del Laboratorio Natural Andes del Sur de Chile: consideraciones a partir de un análisis bibliométrico y mapeos participativos

Manuel Enrique Schilling Danyau¹⁻², Carla Isabel Marchant Santiago²⁻³, Pablo Sánchez Alfaro¹⁻², Alejandra Vanesa González Sanchis¹⁻², Patricio Alberto Contreras Fuentes¹⁻², Javiera Constanza Rubio Poblete², Fernanda Olivares²

(1) Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile

(2) Laboratorio Natural Andes del Sur de Chile

(3) Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile

El Laboratorio Natural (LN) Andes del Sur de Chile comprende la zona andina de las regiones de la Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (38°-44°S), albergando numerosos poblados y cerca de 250.000 habitantes, con la densidad poblacional más alta de los Andes a nivel nacional. Aquí se encuentran los volcanes de mayor riesgo del país: Villarrica, Llaima, Calbuco, Puyehue-Cordón Caulle, Osorno, Mocho Choshuenco, Carrán-Los Venados, Chaitén y Lonquimay. También se ubican las Reservas de Biosfera Araucarias y de Bosques Templados Lluviosos de los Andes Australes, y el Geoparque Kütralkura, los tres reconocidos internacionalmente por la UNESCO. Esta combinación de volcanes activos, zonas pobladas, y ecosistemas únicos a nivel mundial han atraído la atención de investigadores de todo el mundo y justifican su distinción como laboratorio natural. Específicamente, el LN Andes del Sur de Chile promueve la conformación de una red entre actores vinculados a la academia, sectores público y privado, y organizaciones de la sociedad civil que buscan contribuir al desarrollo local a través de la ciencia, la tecnología, el conocimiento y la innovación (CTCI).

En una primera etapa, se realizó un diagnóstico de la producción científica en el LN Andes del Sur de Chile a partir de un análisis bibliométrico. Las investigaciones e iniciativas catastradas se clasificaron en tres laboratorios temáticos (LT): 1) Evolución y herencia geológica; 2) Cambio global: interacciones bosque, suelo y recursos hídricos; y 3) Modos de vida y habitar de montaña. Entre las singularidades asociadas al primer LT se reconocieron las siguientes: 1) un arco volcánico activo donde se encuentran 27 de los 92 volcanes más activos del país según el ranking de riesgo específico elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería; 2) el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui que controla la localización del volcanismo en este segmento, 3) fuentes termales asociadas a la actividad volcánica y tectónica que favorece el flujo de calor anómalo hacia la superficie; y 4) la ocurrencia de diversos eventos naturales que han impactado fuertemente a la sociedad, como son erupciones volcánicas, remociones en masa y terremotos. Los resultados del análisis bibliométrico arrojaron 772 investigaciones científicas publicadas entre los años 1982 y 2021, que se encuentran indexadas en las plataformas Web of Science (WoS), Scopus y SciELO. De todas estas, 379 están relacionadas con temáticas ligadas a las ciencias de la Tierra y el territorio, siendo el LT1 el que tiene una mayor productividad científica. La principal línea de investigación está ligada a la volcanología y el peligro volcánico. Le siguen después la tectónica de placas y peligro sísmico, mineralogía y petrología, geotermia y sistemas hidrotermales, y procesos de remoción en masa. Contrariamente, no se encontraron publicaciones indexadas relacionadas al estudio de la geodiversidad y el patrimonio geológico del LN Andes del Sur.

Paralelamente, se realizó un análisis cualitativo de literatura gris integrada por alrededor de 200 documentos que incluyen tesis de pregrado y postgrado, libros, actas de congresos, informes técnicos de organismos públicos, normativas, entre otros. Esta información ha sido analizada de manera cualitativa ya que sus características intrínsecas dificultan un análisis más detallado. Además, en 8 de las 28 comunas incluidas en el territorio se hicieron mapeos participativos con el objetivo de identificar actividades e iniciativas que vinculan ciencia y territorio. En estos mapeos participaron más de 100 actores locales, incluyendo investigadores de universidades regionales, funcionarios municipales, y representantes de organizaciones ciudadanas, y permitieron identificar cerca de 100 iniciativas científicas.

A diferencia de lo que se observa en las publicaciones indexadas, el análisis de la literatura gris y el mapeo participativo evidencian la existencia en el territorio de una gran cantidad de información científica, actividades y proyectos relacionados con la geodiversidad y el patrimonio geológico. Finalmente, se reconoce que la aplicación de la información y conocimiento geocientífico puede apoyar el desarrollo de las comunidades locales, especialmente a través del geoturismo, la gestión de recursos y riesgos naturales, la educación en ciencias de la Tierra en todos los niveles educativos, y el monitoreo de la calidad ambiental.

Palabras Clave: Laboratorio Natural, Andes del Sur de Chile, Geodiversidad y Patrimonio Geológico, Análisis Bibliométrico, Mapeos Participativos

Financiamiento: Esta iniciativa es financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo a través del proyecto ANID Redes LN007.

Identificación, caracterización y cuantificación del geopatrimonio en el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (Región de los Ríos, Chile)

Maya Soto Plasencio¹, Manuel Schilling¹, Daniel Melnick¹

(1) Universidad Austral de Chile, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Independencia 631, Valdivia, Chile

El complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle presenta una configuración que alberga características geotermales, estructurales y geológicas únicas para los Andes del Sur. Diversas manifestaciones superficiales permiten evidenciar el sistema geotermal más activo de la Zona Volcánica Sur y el segundo a nivel país. En el registro histórico también se encuentran las erupciones más icónicas del complejo, y pese a su enorme cantidad de estudios geocientíficos, su aprovechamiento educacional y turístico ha sido limitado.

Este estudio tiene como objetivo el inventariar el patrimonio geológico del Complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle mediante la cuantificación y caracterización de sitios de interés geológico y la elaboración de un mapa geomorfológico actualizado. El trabajo pretende ser un aporte a la valoración del geopatrimonio, promoviendo su continuo estudio, además de fomentar el turismo de la zona andina de la Región de los Ríos.

Se utilizó la metodología propuesta por Brilha (2016) modificada para el área más reducida, implicando una primera etapa de selección y caracterización de sitios de interés geológico y una segunda etapa de cuantificación de éstos. Se realizaron campañas de terreno el presente año y estrategias de utilización de los resultados obtenidos

Se obtuvieron 15 sitios preliminares de los cuales 9 fueron seleccionados posterior al trabajo de campo. Se realizó un ranking de valor científico, potencial de uso educativo, turístico y riesgo de degradación en base a extensos criterios previamente definidos. Destacan sitios como Las Sopas, Puyehue y el ridge de 1960 con altos valores ponderados; en general todos los sitios presentan bajo riesgo de degradación. En los sitios seleccionados y el estudio geomorfológico de la zona se reflejan los principales eventos volcánicos recientes del Cordón Caulle, así como sus productos y procesos principales de manera clara y entendible. Es por esto que se obtienen altos valores potenciales para el área de estudio. Las limitaciones principales radican en el acceso a la zona de estudio, existiendo barreras tanto físicas como de permisos de acceso. Se debe potenciar el estudio y turismo en la zona.

Palabras Clave: geopatrimonio, geomorfología, Cordón Caulle, volcanismo.

Financiamiento: Proyecto Turismo de Montaña de la Región de los Ríos CORFO.

Agradecimientos: Agradezco a Daniel Melnick, Valentina Armeni y Cristóbal Brañas por la gestión del terreno. A los guías de Lago Ranco y a Manuel Schilling por las gestiones y financiamiento.

Metodología Para la Evaluación de Glaciares Como Patrimonio Geológico, con Aplicación en el Territorio del Proyecto Geoparque Pillanmapu, Región del Maule, Chile

Emil Stefani Signorio¹⁻², Francisco Hervé Allamand²⁻⁵, Camilo Rada Giacaman³, Andrés Rivera Ibáñez⁴, Rodrigo Pérez Garay¹

(1) Fundación Geoparque Pillanmapu, Calle 16 Sur 542, Talca, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Universidad de Magallanes, Departamento de Ciencias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Av. Pdte. Manuel Bulnes 1855, Punta Arenas, Chile

(4) Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Portugal 84, Santiago, Chile

(5) Universidad Andrés Bello, Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, República 220, Santiago, Chile

En las últimas tres décadas, el interés de geocientistas por estudiar el patrimonio geológico ha crecido sostenidamente. Prueba de ello son los centenares de metodologías que se han propuesto para evaluarlo. Muchas de estas han sido específicamente diseñadas para evaluar elementos particulares de la geodiversidad, como el patrimonio paleontológico o geomorfológico. A pesar de que los glaciares poseen una serie de rasgos que los diferencian de otros elementos de la geodiversidad, a la fecha no existe ninguna metodología que sea exclusiva para la evaluación de glaciares. Este trabajo propone, entonces, la primera metodología para evaluar glaciares como patrimonio geológico.

La metodología desarrollada consiste en 6 pasos que permiten, en última instancia, la propuesta de estrategias de gestión para glaciares. Uno de los pasos, quizás el más importante, es la evaluación cuantitativa, la cual valúa de 0 a 100 puntos al glaciar en cuestión bajo cuatro indicadores distintos: Valor Científico (VC), Peligrosidad Asociada (PA), Riesgo de Degradación (RD) y Valor de Uso (VU).

La metodología fue aplicada en los glaciares presentes dentro del territorio del proyecto Geoparque Pillanmapu, es decir, en prácticamente la totalidad de la cordillera de la región del Maule, Chile. Dicho territorio cuenta con 131 glaciares, de los cuales 76 corresponden a glaciaretos, 32 a glaciares rocosos y 23 a glaciares de montaña. Estos suman una superficie y volumen total de 19,61 km² y 0,43 km³ respectivamente. Adicionalmente, se encontró un espesor promedio de 21,3 m en glaciares de montaña, 13,3 m en glaciares de roca y 7,9 m en glaciaretos. Por otro lado, los glaciares de la cordillera maulina han retrocedido sostenidamente, al menos desde 1950, a una tasa de pérdida de superficie englacada y de volumen de -1,1 km² anuales y -0,02 km³ anuales respectivamente.

Se aplicó la evaluación cuantitativa a los glaciares código CL107103008 y CL107103009 (según el IPG2022_v1), referidos, para efectos de este estudio, como glaciares Volcán Planchón Peteroa Norte y Sur respectivamente (VPPN y VPPS), ambos ubicados en la ladera poniente del Vn. Peteroa. En particular, en el glaciar VPPS se realizó un balance de masa geodésico, encontrándose una ablación anual promedio de -1,6±0,2 m w.e. entre el 2000 y el 2022. En base a este y otros resultados se encontró que el glaciar VPPS posee un VC de 24,5, una PA de 22,1, un RD de 86,8 y un VU de 60,8 puntos. El glaciar VPPN un VC de 44,8, una PA de 28,4, un RD de 74,8 y un VU de 57,0 puntos. Un análisis cualitativo de dichos resultados permitió la generación de propuestas de estrategias de gestión para ambos glaciares. De manera generalizada, estas consisten en la sugerencia de estudios de aportes hídricos y peligro geológico, en la sensibilización de las comunidades que habitan aguas abajo de estos glaciares respecto a estas materias, algunos lineamientos generales sobre los usos que se les puede dar y, finalmente, en la proposición del VPPN como geositio oficial del proyecto Geoparque Pillanmapu y de la Sociedad Geológica de Chile.

Palabras Clave: Glaciar, Geopatrimonio, Evaluación Cuantitativa, Metodologías para la Evaluación del Geopatrimonio.

Financiamiento: Financiado por la Fundación Geoparque Pillanmapu.

Agradecimientos: A Francisco Hervé, Camilo Rada, Andrés Rivera, James McPhee, Reynaldo Charrier, Catalina Medina, Felipe Ugalde, Cristian Peralta, Rodrigo Pérez y tantos otros.

Referencias:

- Braun, M., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130–136. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>.
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>.
- Cuffey, K., & Paterson, W. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>.
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>.
- Marangunic, C., Marangunic, P., & González, P. (2008). *Manual de Glaciología*. Dirección General de Aguas.
- Noveroy, C. (1987). Chile. Inventario de glaciares de la hoya del río Mataquito. Dirección General de Aguas. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32669>.
- Reynard, E., Perret, A., Bussard, J., Grangier, L., & Martin, S. (2016). Integrated Approach for the Inventory and Management of Geomorphological Heritage at the Regional Scale. *Geoheritage*, 8(1), 43–60. <https://doi.org/10.1007/s12371-015-0153-0>.
- Rivera, A., Bown, F., Bravo, C., Carrión, D., Casassa, G., Flores, C., López, P., Rada, C., Vivero, S., & Zenteno, P. (2009). Estrategia Nacional de Glaciares. Informe para Dirección General de Aguas -MOP.
- Schilling, M., Mourgues, A., Contreras, K., Benado, J., & Partarrieu, D. (2015). Patrimonio geológico y su conservación en Chile: avances y perspectivas. XIV Congreso Geológico Chileno, 2011–2014.

Estado del arte en el geoparque mundial UNESCO Kütralkura, aprendizajes y desafíos de proceso de renovación - ampliación del territorio

Gabriela Tascon Fuenzalida¹⁻², Patricia Herrera², Erika Alvarez³, Manuel Schilling⁴

(1) Universidad Católica de Temuco, Ingeniería, Ingeniería, Temuco, Chile

(2) Asociación de Municipalidades Cordilleranas Araucanía

(3) Universidad Mayor, Territorio Mayor, Temuco, Chile

(4) Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

El Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura ha realizado recientemente un exitoso proceso de renovación y ampliación de sus fronteras frente a la UNESCO, proceso que ha sido un desafío con el cual se ha logrado ampliar la participación local, fortaleciendo y estrechando lazos con las comunidades reconociendo en ellas una gran variedad de saberes sobre territorio, tanto en su habitar común como a nivel técnico, haciendo parte a esta comunidad en el proceso de levantamiento y caracterización de geositos tanto en los antiguos límites del Geoparque y en su ampliación. Este proceso contó con el financiamiento de un fondo FIC ejecutado por la universidad Mayor con sede en Temuco y que generó: una plataforma web que incorpora información de geositos, georutas, emprendedores locales, actividades, material educativo, etc.; la nueva guía del Geoparque, material educativo (juegos y libro) y una aplicación que fue utilizada para el levantamiento y caracterización de nuevos geositos, aplicación que fue usada por emprendedores turísticos con funcionarios municipales, ambos con capacitaciones en Geoparque y apoyada por un equipo técnico contratado con esta finalidad. Por otro lado, este proceso también ha logrado fortalecer el apoyo de servicios gubernamentales y actores políticos a nivel regional y nacional.

Esta nueva etapa (segundo período con el reconocimiento desde UNESCO) y nuevos límites (inicialmente 4 comunas Curacautín, Vilcún, Melipeuco, Lonquimay y ahora se agregan Cunco, Curarrehue y Lautaro) representan para el Geoparque un gran desafío, el cual consiste en seguir trabajando el empoderamiento de la comunidad local desde el posicionamiento del conocimiento en geociencias que viene a complementar el saber ancestral que existe desde siempre en el territorio; lo cual debe tener un impacto real en las y los habitantes del territorio, mejorando su calidad de vida entendiendo que los territorios Geoparques son áreas de desarrollo económico asociado a prácticas sustentables como el geoturismo y laboratorios naturales para trabajar la Geoeducación, entre otros.

Las estrategias para lograr este objetivo fue incorporar a las municipalidades en las mesas técnicas, fortalecer una mesa de trabajo en el área de educación, apoyar el desarrollo de geoturismo que sea administrado por empresarios locales, entre otros. Esta estrategia considera un trabajo en red a diferentes niveles desde lo local como organizaciones funcionales, municipio; regionales como el GORE, Universidades Regionales; nacionales: como SERNAGEOMIN, y servicios gubernamentales en general; e internacional: red GeoLac y la GGN.

Actualmente entendemos desde la mesa de gestión del geoparque que existen brechas en las que hay que seguir trabajando, entendiendo que el territorio Geoparque se encuentra emplazado en un área donde actualmente existen conflictos que deben ser trabajados y abordados desde el respeto y la educación siendo este espacio un lugar de encuentro para aportar en el mejor vivir de todas y todos los habitantes del territorio.

Palabras Clave: Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura, GeoEducación, GeoConservación, Desarrollo sustentable, GeoPatrimonio.

Rescatando la Identidad y el Geopatrimonio de Cocholgué

Emiliano Tomás Vega Ruiz¹⁻³, Ruth Roa Reyes¹, Fernanda Pérez Guzmán¹, Fabiola Rodríguez Rodríguez¹, Michael Bautista Mendoza¹, Nicolás Sanhueza²

(1) Corporación Desarrollo ConCiencia, Tomé, Chile

(2) Ilustre Municipalidad de Tomé, Dirección de Turismo, Ignacio Serrano 1185, Tomé, Chile

(3) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

La falta de transferencia de conocimientos científicos del Patrimonio Geológico y Natural hacia los territorios genera un desconocimiento que impide visualizar la totalidad del valor geológico de las localidades. Esta problemática ha sido identificada en diversas zonas del país donde, producto de una visión intencionalmente sesgada de la conservación que prioriza el medio vivo por sobre el físico, la protección del territorio ha sido insuficiente. La íntima dependencia entre ambos medios debe ser considerada y este nuevo concepto de Diversidad Natural [1] enseñado a las comunidades. Al estudiar íntegramente los ecosistemas se demuestra que los procesos físicos y biológicos del territorio están intrínsecamente ligados, generando una co-dependencia y simbiosis muy estable y, a la vez, muy frágil en caso de ser alterada por la actividad antrópica. Debido a la creciente relevancia y trascendencia de este paradigma es que ha surgido el concepto de geodiversidad.

Los elementos geológicos y sus dinámicas son de vital importancia, no sólo para la vida, sino para mantener y sostener el flujo de las funciones ecosistémicas de los sistemas terrestres y marinos, y la conservación de hábitats y paisajes. Son elementos dinámicos; transforman, generan y consumen energía, se transforman a ellos mismos y modifican ecosistemas sin la necesidad de intervención biológica, y además son importantes partícipes de los procesos y transformaciones sociales que han moldeado la identidad cultural de la localidad de Cocholgué, permitiendo trabajar desde una perspectiva integral donde el valor del patrimonio geológico es potenciado tanto por factores naturales, sociales y culturales y sus interacciones. En este contexto, nace como objetivo la integración de la geodiversidad [2] al conocimiento público debido a que permite un íntegro entendimiento de la Diversidad Natural, fortaleciendo el desarrollo de políticas de conservación y el manejo de áreas de protección natural y robusteciendo la identidad cultural al considerar a la geodiversidad local como factor determinante de su formación.

Se trabajó en conjunto con estudiantes de la Escuela Básica de Cocholgué y con la comunidad, permitiendo una constante retroalimentación y aprendizaje colectivo entre los actores. Éstas fueron planificadas y ejecutadas por un equipo interdisciplinario, donde las metodologías de trabajo fueron realizadas en modalidades de talleres y terrenos, apuntando hacia un fortalecimiento del conocimiento de conceptos generales de carácter patrimonial, social y geológico, y un aprendizaje integral y transversal de las dinámicas naturales, geológicas y sociales del territorio y cómo éstas han interactuado entre sí.

* Los talleres **¿Cómo se ha formado nuestra identidad?** e **"Introduciéndonos en el mundo de la Geología"** apuntan al diagnóstico histórico, identitario y patrimonial, y discutir las bases de la geología para comprender y entender el paisaje geológico del territorio de forma integral, relacionando los conceptos aprendidos, desde lo global hacia lo local, respectivamente, complementadas con actividades lúdicas y de experimentación que permitieron comentar e identificar sobre los diferentes patrimonios que reconocían en el territorio.

* El taller **Conozcamos nuestro Geopatrimonio** y los terrenos realizados fueron trabajados en conjunto con el geólogo del municipio de la comuna de Tomé, donde los conceptos de geoturismo y geopatrimonio fueron discutidos. Con el uso de maquetas didácticas, junto con exposiciones de rocas y fósiles, se resaltaron los valores geológicos de la localidad y de la zona costera de la región, para luego aplicar en terreno los conocimientos aprendidos.

* En el taller **Identificando el Patrimonio en nuestro entorno** se realizaron conversatorios comunitarios, donde se rescataron tradiciones, culturas y leyendas locales relacionadas con el geopatrimonio y, posteriormente, con la información total recopilada, se construyeron cartografías sociales, con la finalidad de conocer esta nueva percepción y grado de identidad que mantienen con el territorio, y de identificar zonas de valor geopatrimonial que incluyan el factor social.

Así, se avanzó en la valorización geológica y cultural de Cocholgué mediante la retroalimentación del conocimiento científico y territorial entre los distintos actores. Se creó en conjunto la ruta geológica con más de 30 puntos de interés con el espacio natural como escuela al aire libre, identificando las múltiples aristas de la geología, junto a su valor natural y cultural agregado, y el fortalecimiento de vínculos entre la comunidad, SERNAGEOMIN y GORE, academia y municipio, donde con este último, gracias a esfuerzos en común, se logró la incorporación del concepto de Geopatrimonio dentro de la nueva Ordenanza de Medio Ambiente.

Palabras Clave: Geopatrimonio, Patrimonio Natural, Identidad, Cultura.

Financiamiento: Proyecto FNDR financiado por el Gobierno Regional de la Región del Biobío y ejecutado por Corporación Desarrollo ConCiencia.

Agradecimientos: A la comunidad cocholguana, JJVV 13-A Caleta Chica Cocholgué, profesores, profesoras y auxiliares de la escuela, y a Nicolás por su apoyo y disposición.

Referencias:

- [1] Santana, C. (2019). Natural diversity: how taking the bio-out of biodiversity aligns with conservation priorities. From Assessing to Conserving Biodiversity: Conceptual and Practical Challenges, 401-414.
- [2] Serrano, E., & Ruiz-Flaño, P. (2007). Geodiversity: a theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica*, 62(3), 140-147.

Valorización de la geodiversidad del Volcán Hornopirén: Contribuciones al Geoparque Patagonia Verde

María Ignacia Yasky Dreyfus¹, Camilo Sánchez Yáñez¹⁻³, Tomás Martínez Ortega²

(1) Universidad Mayor, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Manuel Montt 367, Santiago, Chile

(2) Universidade do Minho, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, 4710 - 057 Braga, Braga, Portugal

(3) Cobrizo, Geología Ambiental, Linares, Chile

Los geoparques Mundiales de la UNESCO se definen como áreas geográficas únicas y unificadas donde se gestionan sitios de relevancia geológica a través de la protección, educación y desarrollo sostenible (UNESCO, 2018). Actualmente en la Patagonia Verde, se está llevando a cabo el proyecto del geoparque que tiene entre sus objetivos proteger y divulgar el patrimonio natural y geológico de cinco comunas de la Región de Los Lagos: Cochamó, Hualaihué, Chaitén, Futaleufú y Palena.

La comuna de Hualaihué, con su capital en Hornopirén, alberga una población de 8.944 habitantes, de los cuales más de un tercio, es decir, 3.629 personas, viven en el pueblo de Hornopirén (Censo, 2017). Esta localidad se encuentra ubicada a 10 km del volcán homónimo y está inmerso en un contexto geológico particular debido a los diversos elementos tectono-volcánicos que lo formaron y componen en la actualidad. Estos elementos incluyen el Sistema de Fallas Liquiñe Ofqui, donde se encuentra el Volcán Hornopirén, así como coladas de lava, corrientes de densidad piroclásticas, depósitos laháricos y depósitos piroclásticos (Mella, 2008; Mella et al., 2021). Estos últimos son resultado de las diferentes etapas de actividad eruptiva del Volcán Hornopirén, cuyos registros se extienden desde el Pleistoceno inferior hasta el Holoceno, abarcando desde hace aproximadamente 11.700 años hasta el año 1742 (Mella et al., 2021).

La relación existente entre el volcán y la localidad de Hornopirén implica que la zona esté constantemente expuesta a ser afectada por peligros volcánicos potencialmente catastróficos (Mella, 2013; Mella et al., 2021). Sin embargo, la comunidad local cuenta con un conocimiento técnico-geológico limitado en lo que respecta a los atributos y peligros geológicos asociados, así como al potencial valor patrimonial relacionado con el Volcán Hornopirén.

Por esta razón, se llevó a cabo un estudio para reconocer la geodiversidad del Volcán Hornopirén, entendida como la variedad de elementos geológicos que lo conforman e ilustran su evolución geológica (Gray 2004; Carcavilla et al., 2007). Esto permitió realizar una identificación, caracterización y valoración a través de una metodología cualitativa y cuantitativa.

Los resultados se presentan en un inventario que consta de 8 sitios de interés, los cuales representan tres contextos principales que ilustran las diversas etapas eruptivas del volcán: productos efusivos, productos explosivos y peligros volcánicos. Estos contextos se traducen en una propuesta de 3 georutas que permiten difundir el conocimiento geológico a través del geoturismo y geoeducación.

Con estas herramientas se espera contribuir al empoderamiento local que permite promover un desarrollo económico, social y cultural a través de actividades recreativas que diversifiquen los destinos turísticos locales, además de actividades educativas para la concientización de los peligros volcánicos.

Palabras Clave: Volcán Hornopirén, Geopatrimonio, Geodiversidad, Geoeducación, Geoparque Patagonia Verde.

Financiamiento: Universidad Mayor.

Referencias:

- Gray, M. (2004). Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. John Wiley & Sons.
- Carcavilla, L. (2007). La divulgación de la geología en espacios protegidos: las Georutas del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara). Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15(1): 65-76
- Mella, M. (2008). Petrogêneses do complexo vulcânico Yate (42, 30°S), Andes do Sul, Chile (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo)
- Mella, M. (2013). Mapa preliminar de peligros volcánicos del volcán Hornopirén, Región de Los Lagos. Informe inédito, Subdirección Nacional de Geología. Programa de Riesgo Volcánico. Escala 1:75.000. Sernageomin.
- Mella, M.; Toloza, V.; Bertín, L. (2021). Peligros del volcán Hornopirén, región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 37: 51 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

Geoethics: resources, risks and responsibilities

Giuseppe Di Capua¹⁻²⁻³

- (1) National Institute of Geophysics and Volcanology, via di Vigna Murata 605, Rome, Italy
 (2) International Association for Promoting Geoethics (IAPG), via di Vigna Murata 605, Rome, Italy
 (3) IUGS Commission on Geoethics, via di Vigna Murata 605, Rome, Italy

The sustenance and development of human civilization depend on the supply of natural resources (Arvanitidis et al., 2017). International competition to acquire minerals, energy, and materials often leads to national and international conflicts as countries strive to establish delicate geopolitical balances in the strategic management of resources (Feldman, 2011).

Natural hazards pose an ongoing threat to human communities (AON, 2023). Earthquakes, volcanic eruptions, and floods are phenomena that have a significant impact on millions of people, influencing their prospects for life and productive activities. In an era of unprecedented global climate change, there is a local increase in the frequency of extreme events, including heat waves and intense rainfall concentrated within short time frames. The rising population and the number of structures exposed to these phenomena, coupled with the growing vulnerability of human communities to more frequent occurrences, the increasing complexity of managing anthropogenic landscapes, and the escalating costs of restoring homes, economic activities, and damaged infrastructure, all contribute to the mounting challenge of mitigating and adapting to these extreme events (Peppoloni, 2023).

In this context, the question of "what to do?" emerges as a complex puzzle that demands a multifaceted response across various levels (scientific, technical, political, economic, psychological, cultural). In a rapidly evolving world, it is crucial to contemplate and deliberate upon the roles and responsibilities of geoscientists. Geoethics has emerged precisely with the purpose of initiating this process of critical analysis within the geosciences, shedding light on both weaknesses and strengths (Peppoloni et al., 2022).

While geosciences themselves are ethically neutral, geoscientists, through their professional choices, are not. During the course of their work, they frequently encounter technical-scientific challenges that necessitate decisions grounded in ethical considerations of what is right and necessary. As a result, they venture into the realm of ethics, sometimes without full awareness and lacking the cultural preparation to analyze these issues from alternative perspectives, as they may not have received adequate training in this regard.

Geoethics serves as an essential framework for navigating the intricacies of society's most pressing issues. It serves as a convergence point between professional ethics, closely intertwined with work practices, and the intersection of geosciences, decision-makers, and society. Geoethics assumes the role of a valuable instrument in addressing both professional and societal challenges by fostering critical analyses of the impact of geosciences on society. Furthermore, it aids in achieving a delicate equilibrium between sustainable development and the greater public good.

When it comes to the issue of natural resources, geoscientists often face the challenge of making decisions that go against their personal moral and professional convictions due to conflicting company objectives. This highlights the importance of establishing ethical and legal frameworks that prioritize the environment and human communities as vital societal assets, while also regulating and mitigating the tendencies towards destructive and self-centered utilitarianism. Implementing such frameworks can bring significant benefits to all stakeholders involved and aid geoscientists in promoting a culture of protection and responsible land management (Arvanitidis et al., 2017).

In the realm of defense against natural hazards, geoscientists serve as experts in understanding the dynamics of natural processes. Their responsibility lies in providing decision-makers with the most accurate knowledge and findings derived from their studies, encompassing probable events and potential scenarios. Geoscientists themselves are not tasked with making decisions; it is the responsibility of decision-makers to carefully weigh the social and economic costs of their choices in relation to mitigation efforts. Geoethics establishes a clear and unequivocal separation of roles and responsibilities between geoscientists and decision-makers. This division enables geoscientists to protect themselves against the inevitable pressures exerted by politicians, decision-makers, media, and the public when handling emergencies or implementing strategies to mitigate hazardous phenomena, all without compromising their scientific beliefs. As emphasized by Peppoloni et al. (2023) in relation to geoscientists dealing with natural risks, the: "freedom to abide by their scientific beliefs is a basic tenet of geoethics."

Keywords: Geoethics, Natural resources, Natural risks, Geoscientists, Society.

References:

- AON (2023). 2023 Weather, Climate and Catastrophe Insight. <https://www.aon.com/weather-climate-catastrophe/index.aspx>
- Arvanitidis N., Boon J., Nurmi P. and Di Capua G. (2017). White Paper on Responsible Mining. IAPG - International Association for Promoting Geoethics, <http://www.geoethics.org/wp-responsible-mining>
- Feldman D.L., ed. (2011). The Geopolitics of Natural Resources. Cheltenham, UK and Northampton, MA: Edward Elgar, Inc. ISBN 978-0857930743.
- Peppoloni S. (2023). Geoethics to Face Natural Risks by Improving Societal Resilience. In Malheiro A., Fernandes F., Chaminé H.I. (Eds.), Advances in Natural Hazards and Volcanic Risks: Shaping a Sustainable Future. NATHAZ 2022. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham, 3-8. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25042-2_1.
- Peppoloni S. and Di Capua G. (2022). Geoethics: Manifesto for an ethics of responsibility towards the Earth. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98044-3>.
- Peppoloni S., Woo G., Martí J., Di Capua G. (2023). Geoethics: The Missing Piece in the Separation of Responsibility Between Volcanologists and Decision-Makers. In Malheiro A., Fernandes F., Chaminé H.I. (Eds.), Advances in Natural Hazards and Volcanic Risks: Shaping a Sustainable Future.
- NATHAZ 2022. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham, pp. 19-23. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25042-2_4.

El rol del experto/a geocientista en la sociedad: ¿qué se espera de nosotros/as?"

Vicente Letelier¹

(1) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre 194, Of. 61, Santiago, Chile

A los y las profesionales de las Ciencias de la Tierra se nos suele considerar como "expertos o expertas" en las temáticas en que nos especializamos. Generalmente, las implicancias de lo que esa consideración significa se aprende en el ejercicio práctico de la profesión, a partir de los aciertos y fracasos que cada quien acumula en su trayectoria.

Aquí nos hacemos algunas preguntas relacionadas con el tema de la experticia: ¿en qué consiste exactamente ser experto/a? ¿Qué se espera de nosotros/as? ¿En qué circunstancias un experto/a falla en su actuar? Dar respuesta a estas interrogantes nos permitirá hacer explícitas una serie de exigencias que suelen darse por obvias y que, sin saberlo, generan tensiones en nuestro desarrollo profesional. Además, reflexionar en torno a esta temática puede ayudar en la promoción de buenas prácticas en los espacios de trabajo, particularmente en aquellos donde se pone en juego el diálogo entre profesionales de distintas disciplinas.

En el libro "¿Por qué confiar en la ciencia?", de la geóloga e historiadora de las ciencias Naomi Oreskes, se define al científico directamente como un "experto designado": *"Los científicos son nuestros expertos designados para estudiar el mundo. Por lo tanto, en la medida en que debemos confiar en que alguien nos cuente sobre el mundo, debemos confiar en los científicos"* (Oreskes, 2021). De este modo, los científicos/as serían expertos/as en los que la sociedad *debe confiar*.

Ahora bien, ¿en qué consiste esa confianza? Para responder a esta pregunta, aprovecharemos una columna de Carlos Peña (2023) publicada en El Mercurio. El tema de la columna es el rol de la Comisión Experta en el proceso constituyente en curso, y en su argumentación, el rector aprovechó de repasar cuáles son las características que, por acuerdo implícito, la sociedad les atribuye a los expertos/as en general:

- Un conocimiento pormenorizado de la disciplina que profesan.
- Una cierta práctica en la investigación.
- Una cierta práctica en el intercambio de razones.
- Una determinada reputación que cuidar, que les impide actuar de cualquier forma.

Además, agrega que los expertos/as deberían saber:

- Exponer razones.
- Atender a las razones y argumentos que no son los suyos.
- Ponerse en disposición de persuadir a otros.
- Ponerse en disposición de ser persuadido por otros.
- Hacer un uso público de la razón, no un uso privado de ella.
- Deliberar según ponderación de razones, no por afinidades políticas o caprichos personales.

¿Y por qué nos interesa revisar la opinión de un jurista? Precisamente porque nos devuelve la mirada desde una vereda que no es la nuestra. Porque en ella se dejan ver las expectativas que, tácitamente, la opinión pública tiene sobre nuestra labor. Y porque son estas, y no otras, las características que se buscarán en nosotros/as toda vez que nuestro quehacer se ponga en entredicho.

Como se ve, las expectativas que están puestas sobre un experto/a son diversas: para hacer bien nuestra labor, para no "fallar" en su ejercicio, nuestro comportamiento profesional debería estar en sintonía con esta multiplicidad de exigencias - generalmente - no dichas.

Desde la perspectiva de una ética profesional, se pueden extraer algunas conclusiones que podrían ser útiles para promover espacios donde el diálogo entre profesionales sea al mismo tiempo saludable y productivo:

1. La opinión en calidad de experto/a se debería realizar únicamente en la disciplina donde se tiene un conocimiento pormenorizado.
2. En caso de que se nos solicite opinar sobre otras temáticas diferentes, conviene dejar en claro que no se habla desde la experticia profesional específica.
3. Ser considerado experto/a no es garantía de tener la razón, sino más bien, de saber explicitar las razones que están en discusión, y saber ponderarlas, de modo de asegurar una deliberación fundamentada.
4. Desempeñar un cargo en el que se requiere experticia, implica un compromiso y una responsabilidad con la sociedad, ya que se pone en juego la confianza que la sociedad ha depositado en el experto/a.
5. Las exigencias y expectativas que las instituciones ponen sobre el cargo de un experto/a, ejercen una presión psicológica que muchas veces se invisibiliza, y que es conveniente saber expresar y gestionar.
6. Crear espacios interdisciplinarios saludables, implica de un compromiso por respetar los alcances y las limitaciones propias de cada ámbito de experticia profesional.

Palabras Clave: experto, experta, rol, compromiso, sociedad.

Referencias:

- Oreskes, N., 2021. ¿Por qué confiar en la ciencia? Editorial Universitaria de Valparaíso, 332 pág. Peña, C., 2023. "Columna de opinión: ¿expertos o jugadores?". Accedido el 16 de junio de 2023, en el siguiente enlace: <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2023/04/21/1092911/cronica-constitucional-columna-de-opinion.html>.

Propuesta de un Código de Geoética para la Comunidad geocientista de Chile

Luisa Pinto Lincofín¹⁻⁹⁻¹¹, Pablo Ramírez²⁻¹¹, Nilda Lay³⁻¹¹, Hernán Bobadilla⁵⁻¹¹, Tania Villaseñor⁴⁻¹¹, Mohammad Ayaz Alam⁶⁻¹¹, Millarca Valenzuela⁷⁻¹¹, José Benado⁸⁻¹¹, Thiare González¹⁻¹¹, Alejandro Pérez⁹⁻¹⁰⁻¹¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, FCFM, Plaza Ercilla #803, Santiago Centro, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Estudios Transversales en Humanidades para las Ingenierías y las Ciencias (ETHICS), Escuela de Ingeniería y Ciencias, FCFM, Beauchef #850, Santiago Centro, Santiago, Chile

(3) Consultoría en Geología Económica, Rosa O'Higgins #135, Dpto. 801, Las Condes, Santiago, Chile

(4) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Avda. Libertador Bernardo O'Higgins #611, Rancagua, Chile

(5) Politecnico di Milano, Departamento de Matemáticas, La Nave, Via Edoardo Bonardi #9, 20133, Milano, Italia

(6) Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Geoespacial y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Enrique Kirberg Baltiansky #03, Estación Central, Santiago, Chile

(7) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Avda. Angamos #0610, Antofagasta, Chile

(8) Universidad de Minho, Departamento de Ciencias de la Tierra, Sede de Gualtar, 4710-057, Braga, Portugal

(9) Universidad Técnica Federico Santa María, Campus Vitacura, Sta. María #6400, Vitacura, Santiago, Chile

(10) Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería, Ejército #146, Santiago, Chile

(11) Sociedad Geológica de Chile, <https://sociedadgeologica.cl/>, Santiago, Chile

La propuesta del Código de Geoética (en lo sucesivo, Código) de la Sociedad Geológica de Chile surge como un objetivo estratégico del Grupo de Geoética dentro de esta institución. Los códigos de ética son una herramienta ampliamente usada para orientar y resguardar las decisiones profesionales en un marco de principios y valores que una comunidad se auto exige. Así, la construcción del Código pretende ofrecer una herramienta a la Comunidad geocientista de Chile que colabore en los procesos de reflexión y toma de decisiones en un marco ético.

Este código está basado en los principios y valores definidos por el Grupo de Geoética y en la Declaración de Geoética de Ciudad del Cabo de la Asociación Internacional para la Promoción de la Geoética de 2016 (Di Capua et al., 2017). Los principios son: integridad, respeto por la diversidad, responsabilidad y desarrollo sustentable. El Código estará compuesto por cuatro títulos:

- 1) Del quehacer profesional y científico.
- 2) De las geociencias y su relación con la naturaleza y la cultura.
- 3) De las geociencias y su relación con la sociedad.
- 4) Del aporte a las nuevas generaciones de científicos/as y profesionales de geociencias.

La estrategia de construcción del Código ha considerado como fundamental la participación activa de la Comunidad geocientista de Chile. Por lo tanto, la propuesta del Código se está enriqueciendo de consultas en encuestas y reflexiones de la Comunidad geocientista de Chile sobre los temas que les importan en relación con la Geoética. De esta manera, se propusieron los valores y principios del Código, y se ha reflexionado y discutido sobre su contenido, por medio de una serie de seminarios enfocados en cada título en desarrollo. Además, se seguirán realizando consultas y reflexiones para validar esta propuesta del Código, previo y durante y posterior al XVI Congreso Geológico Chileno. Finalmente, expertos de la Asociación Internacional para la Promoción de la Geoética (IAPG, por su sigla en inglés), incluyendo representantes de América Latina, participarán en el proceso de validación. Mediante este enfoque, se busca que el Código represente los temas relevantes para la Comunidad geocientista de Chile y cuente con validación a nivel internacional.

Palabras Clave: Código de Geoética, Principios, Valores, IAPG, Comunidad geocientista.

Financiamiento: Este estudio cuenta con el patrocinio y auspicio de la Sociedad Geológica de Chile.

Agradecimientos: A la Comunidad geocientista de Chile, la IAPG y otros profesionales que han participado en el proceso de la construcción y reflexión de los títulos de la propuesta de Código de Geoética.

Referencias:

- Di Capua, G., Peppoloni, S., Bobrowsky, P.T., 2017. The Cape Town Statement on Geoethics. *Annals of Geophysics*, 60, Fast Track 7: Geoethics at the heart of all geoscience. DOI: 10.4401/ag-7553.

Ciencia helicóptero : ¿necesita Chile un marco para proteger la valorización científica de su patrimonio natural nacional?

Adrien Tavernier¹, Gabriel. A Pinto², **Millarca Valenzuela**^{5,6,7}, Ayon Garcia¹, Christopher Ulloa¹, Rómulo Osés³, Anouk Beniest⁴

(1) Universidad de Atacama, IDICTEC LICA, Copiapó, Chile

(2) Universidad de Atacama, INCT, Copiapó, Chile

(3) Universidad de Atacama, CRIDESAT, Copiapó, Chile

(4) Vrije Universiteit Amsterdam, Department of Earth Sciences, Amsterdam, The Netherlands

(5) Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, Chile

(6) Millennium Institute of Astrophysics, Santiago, Chile

(7) Center for Excellence in Astrophysics and Associated Technologies, Santiago, Chile

Como investigadores que trabajamos en los campos de las Geociencias, las Ciencias Ambientales, la Microbiología Ambiental y/o las Ciencias Planetarias, salimos ocasionalmente del marco científico estricto y entramos en el tema de la protección del patrimonio natural nacional de Chile.

Desde la protección de la criosfera y de los meteoritos hasta las aplicaciones tecnológicas basadas en recursos biológicos, nuestro equipo multidisciplinario aprovecha directa e indirectamente las excepcionales condiciones ambientales del territorio nacional chileno. De hecho, nuestro trabajo podría contribuir en ocasiones a proteger los recursos naturales, o a identificar posibles decisiones políticas que podrían conducir a una legislación protectora. A veces, sin embargo, la ciencia necesita protegerse a sí misma llevando a cabo un proceso crítico de sus prácticas, que puede conducir al establecimiento de un marco legislativo. La ética biomédica, por ejemplo, es una ilustración de un campo científico-social de la ciencia que impone activamente restricciones legislativas a sus científicos en ejercicio, lo que hace posible llevar a cabo la investigación científica de una manera segura para la sociedad.

Al igual que la aplicación de restricciones legislativas en medicina, las colaboraciones científicas internacionales requieren directrices para evitar prácticas que hoy en día se conocen como ciencia helicóptero, ciencia paracaídas o neocolonialismo científico. Los tres términos se refieren a la investigación científica llevada a cabo en un país de renta baja y/o media por investigadores extranjeros de países de renta alta sin ninguna colaboración con expertos o comunidades locales. Nuestro trabajo en los laboratorios naturales chilenos de la Puna y el desierto de Atacama nos ha permitido poner de relieve que al menos el ~40% de los trabajos realizados por equipos extranjeros en Ciencias de la Tierra y de la Vida en estas dos zonas geográficas se llevaron a cabo sin la inclusión de investigadores o instituciones locales. En astrobiología y ciencias planetarias ~60% de los estudios publicados no incluyen colaboraciones locales [1].

Con esta presentación proponemos un camino a seguir para limitar este desequilibrio entre publicaciones colaborativas y no colaborativas entre investigadores e instituciones locales de países de renta baja y media y científicos de países de renta alta. Para evitar las prácticas neocoloniales científicas, sería necesario actuar a todos los niveles, desde las comunidades científicas hasta las instituciones académicas y las autoridades gubernamentales nacionales. En todos los niveles, sería también necesario establecer una red de mecanismos de retroalimentación para lograr una protección eficaz del potencial científico del patrimonio natural chileno.

Palabras Clave: Ética, Protección, Ley, Ciencia helicóptero, Chile.

Financiamiento: Este estudio ha sido posible gracias al Plan Chileno de Fortalecimiento de Universidades Estatales Año 2017 (ATA1799) y Año 2020 (ATA20992).

Referencias:

- [1] Tavernier, A., Pinto, G. A., Valenzuela, M., Garcia, A., Ulloa, C., Osés, R., & Foing, B. H. (2023). Trends in planetary science research in the Puna and Atacama Desert regions: Underrepresentation of local scientific institutions? *Meteoritics & Planetary Science*.

Experiencias asociativas entre científicos de diversas universidades chilenas y entre éstos y los diferentes actores sociales y políticos para frenar la extracción masiva de meteoritos desde Chile

Millarca Valenzuela Picon¹⁻⁴, Camila Caviedes Cameron²⁻⁴, Gabriel Pinto²⁻⁴, Claudia Aravena³⁻⁴, Kevin Soto¹⁻⁴

- (1) Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av Angamos 0610, Antofagasta, Chile
(2) Instituto de Astronomía y Ciencias Planetarias INCT, Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile
(3) Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 830, Santiago, Chile
(4) Grupo de Meteoritos y ciencias Planetarias, Sociedad Geológica de Chile, Valentín Letelier 020, Santiago, Chile

De los casi 2.800 meteoritos encontrados en Chile al presente año 2023, y que se encuentran registrados oficialmente en el Meteoritical Bulletin [1] (la plataforma on-line de la Meteoritical Society que tiene toda la información de los meteoritos oficiales, clasificados, provenientes de todo el mundo), menos del 10% se encuentra presente en museos o colecciones nacionales públicas. La mayor cantidad es parte de colecciones privadas de cazadores de meteoritos chilenos y de instituciones extranjeras que periódicamente vienen a buscar meteoritos y se los llevan a sus países.

Esta pérdida de meteoritos constituye también una pérdida de oportunidades al desarrollo científico y cultural del país, que por una parte se puede entender por la falta de voluntades políticas para que este valioso material extraterrestre pueda ser protegido de su extracción desde Chile sin ningún tipo de fiscalización, debido principalmente a la ignorancia a cerca de su importancia científica, al corresponder a fragmentos de cuerpos celestes formados hace 4.560 millones de años, antes incluso que nuestro planeta, y poseedores de importante información sobre el origen del Sistema Solar y la vida. Y otra importante razón, directamente relacionada a la anterior, es la poca información que tienen las personas a cerca de los meteoritos, dado que al ser una línea de investigación relativamente nueva, con pocos exponentes nacionales que la desarrollen aún, la divulgación que se realiza no es suficiente para alcanzar a más público que pueda ir interiorizando la importancia de su preservación y estudio.

Por esta razón, en el año 2016 se creó el Grupo Meteoritos y Ciencias Planetarias (GMCP), al alero de la Sociedad Geológica de Chile (SGCH), para crear un espacio físico y virtual donde estudiantes de geología, astronomía y carreras afines como la geografía, biología, y otras, así como también profesionales de esas áreas, pudieran converger para conversar sobre estas temáticas no abordadas por las ciencias más afines, la Geología y la Astronomía, en las carreras que se dictaban en Chile. La unión multi y transdisciplinaria en este grupo, llevó a generar una serie de eventos tanto de divulgación a la comunidad, como también para la autoeducación del grupo a través de workshop generales y temáticos, e impulsó la asociación de profesores de distintas carreras de Geología (Universidad Católica del Norte, Universidad de Atacama, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile) para incluir nociones básicas de meteoritos en los cursos que se dictaban en ellas, lo que permitió que muchos estudiantes de geología se titularan con tesinas o memorias de título asociadas al estudio de meteoritos encontrados en el desierto de Atacama.

A su vez, los coleccionistas privados chilenos, que habían estado trabajando por mucho tiempo cada uno en solitario, comenzaron también a conversar sobre sus hallazgos, y se unieron ante la llegada de más expediciones extranjeras buscando meteoritos, que luego eran sacados fuera del país. Ellos se han transformado en un grupo educado en las buenas prácticas para la recolección y preservación de sus muestras, impulsando la investigación a través de donaciones a las escuelas de Geología de fragmentos de sus meteoritos, para realizar estudios en ellos y entrenar a más estudiantes en esta temática. Además, han aportado en encontrar un gran número de meteoritos de los tipos menos abundantes (acondritos, condritos carbonáceos y otros).

Desde el 2020 se realizaron reuniones en conjunto para impulsar las iniciativas de protección del patrimonio geológico que representan los meteoritos chilenos. Para las consultas ciudadanas realizadas para la escritura del Proyecto de Ley de Patrimonio, llevado a cabo durante el año 2018 por la Subsecretaría de Patrimonio del Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio, la contribución entregada incluía la realidad de la comunidad científica, la de los cazadores de meteoritos y la de museos y sus colecciones, donde se proponía una normativa que permitiera proteger el 20% de todo meteorito recolectado en Chile por grupos nacionales o extranjeros, quedando esa parte como espécimen tipo en un repositorio nacional (se sugirió el Museo Geológico del Servicio Nacional de Geología y Minería). El 80% restante pertenecería a la persona o grupo que realizó la búsqueda, de esta forma incentivando la cooperación entre científicos y privados.

Actualmente el GMCP-SGCH está en la redacción de una nueva propuesta [2] que irá respaldada por la nueva comunidad meteorítica chilena que incluye a los cazadores privados y a los museos. Este año se realizaron actividades en conjunto para el Día del Asteroide, avanzando en la educación de este importante material geológico extraterrestre a cuidar.

Palabras Clave: meteoritos chilenos, tráfico de meteoritos, ley de protección, colaboración ciencia-privados.

Agradecimientos: Grupo de cazadores de meteoritos chilenos (J. Monsalve, R. Romero, A. Viera, JP. Pizarro, D. Ruíz, M. Rubio).

Viaje por el Río Itata: Un recorrido de Cordillera a Mar en la Región de Ñuble

Francisca Sofia Aguilera Banchemo¹, Antonia Cornejo Reyes¹⁻², Paula Melo Espinoza¹, Cristian Vera Perez¹, Manuel Beltrán Romero³, Ignacio Madinagoitia Lozano¹, Francisco Moya¹, Diego Muñoz Cupitty¹

(1) Apacheta Geoturismo, Santiago, Chile

(2) ONG Buchupureo Acciona, Cobquecura, Chile

(3) Universidad de Concepción, Centro EULA-Chile, Laboratorio Bioindicadores, Concepción, Chile

Introducción

La Región de Ñuble es la más reciente de Chile y con mayores porcentajes de personas que viven en zonas rurales. Esto se refleja en un uso intensivo y preponderante del recurso hídrico para sus actividades económicas, donde las tierras de uso agrícola y uso forestal representan casi un 30% de superficie cada una, respectivamente (Subdere, 2014; Yissi et al., 2022). En este escenario, la región enfrenta desafíos socio-ambientales relacionados con la megasequía hace más de una década en la zona centro y centro-sur de Chile.

Sumado a este fenómeno, existen amenazas locales como el cambio de uso de suelo, destacando la expansión de monocultivos forestales de pinos y eucaliptos, que tienen impactos negativos en el recurso hídrico, la diversidad biológica y ecosistémica (Little et al., 2009; Fuentes et al., 2021). En este contexto, la protección y conservación del agua, amenazada tanto por la megasequía como por el aumento de la demanda de este recurso, adquiere una importancia vital para el desarrollo sostenible de la región.

Sin embargo, el conocimiento y el acceso a la información sobre la importancia de los ecosistemas y sus servicios y su estrecha relación con el recurso hídrico es limitado en la región, contando solo con un museo municipal de Ciencias en la capital regional Chillán. Agregando a lo anterior, en pueblos o sectores lejanos a la capital, la escolaridad es aún más baja comparada con el promedio nacional y los espacios educativos no formales son escasos o inexistentes. Con los desafíos que presenta el país en materia de recursos hídricos y especialmente en la Región de Ñuble, encontrar espacios de acceso a información y educación para la población respecto a esta temática, que superen barreras de ingreso y entendimiento, se vuelve imperante.

Para abordar estas necesidades, diseñamos y ejecutamos el proyecto de divulgación científica “Viaje por el Río Itata: Un recorrido de Cordillera a Mar en la Región de Ñuble” desde una perspectiva multidisciplinaria y con metodologías participativas de la comunidad de Cobquecura. El objetivo fue generar un espacio de encuentro de experiencias de las y los habitantes de la región y divulgar el agua como patrimonio natural desde una perspectiva científico-artística. Nos enfocamos en el ciclo del agua y su relación con los ecosistemas en el territorio englobado por la Cuenca Hidrográfica del Río Itata, a través de una exposición interactiva sobre el recorrido de los ríos y el agua subterránea desde la cordillera hasta el mar. El proyecto tuvo 12 meses de preparación y fue expuesto durante el verano 2022-2023 en el sector La Lobería de Cobquecura, zona costera con alta afluencia turística.

Metodología

El proyecto fue ejecutado por un equipo multidisciplinario de las áreas de geología, biología marina, diseño gráfico y museografía, arquitectura, fotografía, sonido, educación ambiental, turismo y educación. Sumado a este enfoque, la participación y vinculación activa de actores locales fue una prioridad desde la postulación del proyecto, centrado en los segmentos de habitantes y estudiantes de Cobquecura. Se trabajó colaborativamente con estos dos públicos objetivos en tres instancias clave: la realización de grupos focales o focus group, talleres de vinculación y prueba de materiales y una investigación colaborativa sobre los buenos usos del agua realizado con estudiantes del único liceo de la comuna.

Para asegurar la participación, trabajamos en asociación con la Municipalidad de Cobquecura, además del Departamento de Educación Municipal (DAEM) y todos los establecimientos educacionales de la comuna. En cuanto a la población adulta, nos asociamos con organizaciones comunitarias como juntas de vecinos, ferias campesinas, clubes de surf y grupos de defensa medioambiental.

Se realizaron focus group a niños, adolescentes y adultos, diseñados por profesionales del área de la sociología, docentes y expertos. Los temas tratados fueron el agua como recurso y patrimonio natural, las causas y consecuencias de la escasez hídrica y la interrogante ¿de dónde viene el agua?. La investigación entregó información valiosa sobre temáticas que el público consideró urgentes de comprender mediante el proyecto, como la contaminación del agua y las consecuencias de la escasez hídrica en zonas costeras, además de la necesidad de educar a los turistas que visitan la comuna. También nos dio un indicio sobre ecosistemas y paisajes clave para nuestro público, como humedales, desembocaduras y primeros metros de la línea de costa.

Parte del focus group consideró una pregunta que requería ilustraciones de cada participante sobre una imagen del relieve de la cuenca. Con esta metodología se evidenció un alto entendimiento del público sobre las macroformas que conforman el relieve de la región, sumado a una falta de conexión entre el agua superficial y subterránea en el imaginario colectivo, como ha sido constatado en otros estudios en Chile y el mundo (Assaraf y Orion, 2005; Vargas et al., 2023). Los resultados y análisis a partir del focus group fueron incluidos durante la etapa de diseño de la exposición.

Se realizaron guiones de contenido, guiones curatoriales, propuestas arquitectónicas y artísticas durante los primeros seis meses del proyecto, las que fueron producidas, construidas y ensambladas en los seis meses siguientes.

Se contó con apoyo de instituciones de CTCL con la revisión y entrega de documentos desde el punto de vista científico-técnico, que entregó solidez a los contenidos expuestos. Por el lado de la sociología, ecología y biología marina, contamos con el apoyo de la Universidad del BíoBío, y para temáticas de hidrogeología trabajamos con el constante apoyo de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos- Capítulo Chileno, profesionales del Servicio Nacional de Geología y Minería y de la Universidad Mayor.

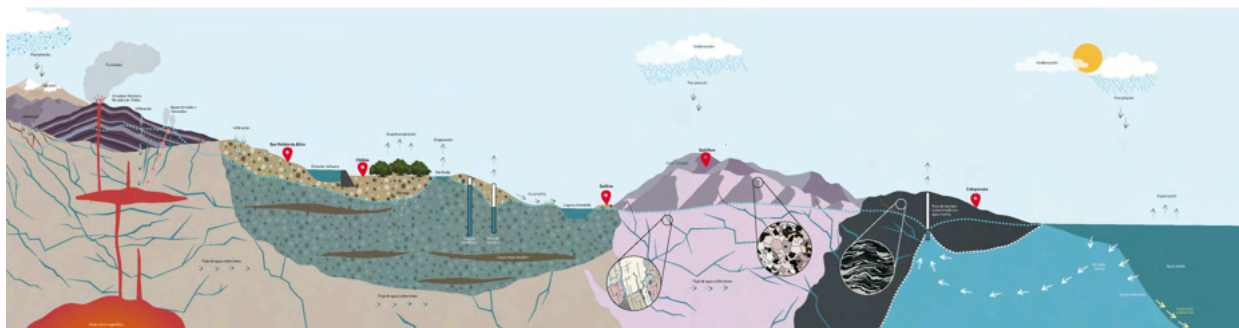


Ilustración científica del panel Ciclo del Agua, en el módulo interior de la exposición Viaje por el Río Itata. La ilustración está sin el texto adicional. Las flechas ilustran parte del ciclo hidrológico.

Resultados

Partes de la exposición

La exposición se materializó como una muestra multisensorial y didáctica con una serie de “módulos” o elementos que crean una experiencia que incentiva la interacción e interés particular de distintos públicos objetivos. El espacio consiste en una arquitectura llamativa, diseñada y construida en su totalidad durante el proyecto, que simula un “circo” abierto de ciencia, con colores y texturas que se camuflan con la arena y colores del entorno en que fue emplazada.

En la bienvenida al recorrido se expone una maqueta 3D pintada a mano según imagen satelital que resalta la geomorfología de la región y sus ríos, destacando la Cuenca del Río Itata, las ciudades principales y la ubicación y recorrido de sus cuerpos de agua superficiales. El tamaño, intensidad de colores, resistencia al ser táctil y su carácter novedoso para la zona hicieron de este elemento introductorio una invitación llamativa a toda la exposición. Este elemento busca sintonizar al visitante con el concepto de cuencas hidrográficas y mostrar la gran cantidad de ríos que la recorren, además de introducir el concepto de cuencas costeras, de fundamental entendimiento para las y los habitantes de la zona donde se expuso.

La pieza central de la exposición es un módulo de 8 metros de largo por 3 metros de ancho al que se accede por una rampa de accesibilidad universal y donde se simula el recorrido que realiza el Río Itata, entrando por la cordillera y saliendo al océano. Este pabellón está ambientado con dos paneles que se enfrentan, uno sobre ecosistemas y otro sobre el ciclo del agua, todo inmerso en un paisaje sonoro, que va reproduciendo distintos sonidos del agua a medida que se avanza a través del módulo con un sistema de audio 5.1.

El panel de ecosistemas muestra la diversidad de especies que sustenta el recorrido de los ríos, dando valor a peces, hongos, plantas, mamíferos, entre otros, con fotografías en alta calidad junto a ilustraciones naturalistas. El panel del ciclo del agua consiste en una ilustración científica con perspectiva de perfil, que expone el ciclo del agua tomando en consideración la interacción con las actividades humanas y lo que sucede bajo la superficie, dando un énfasis al agua subterránea. Este panel logra mostrar conceptos técnicos que se encuentran lejos del imaginario colectivo, como los tipos de acuífero en cada zona de la región, el recorrido del agua subterránea, la intrusión marina, entre otros, de una manera esquemática y apoyada con un texto en un lenguaje cercano, emulando ejemplos en la vida cotidiana de las personas.

Al salir de este recorrido ficticio el visitante se enfrenta al módulo exterior de la exposición, un recorrido libre que trata sobre dos temas principales: la megasequía y la percepción de los habitantes de la región sobre el agua. Respecto al último, se expone un concurso fotográfico regional bajo la temática “el agua como fuente de vida en la Región de Ñuble” donde se resalta parte del patrimonio natural del territorio, además de paneles que relacionan al agua con el nombre de diversas localidades según su traducción desde el mapudungun.

Para la temática de megasequía y escasez hídrica, se expone su definición, causas y consecuencias según la visión de la comunidad local, sumado a datos impactantes sobre sus efectos en los cuerpos de agua de la Cuenca del Itata, como glaciares y ríos.

Finalmente, una serie de infografías enseñan sobre “buenos usos del agua”, con metodologías innovadoras existentes en Chile y el mundo para enfrentar la escasez hídrica. Estos paneles son el resultado de una investigación, redacción y diseño realizado en conjunto entre estudiantes del liceo de Cobquecura y el equipo de trabajo.

Todas las partes anteriormente explicadas generan una exposición que es posible recorrer de manera libre y autoguiada.

Percepción y alcances en la comunidad

El proyecto tuvo una duración de quince meses donde se mantuvo el contacto con la comunidad local, pero fueron ciertos hitos principales donde se dio la mayor interacción y vinculación: focus group para estudiantes de enseñanza básica y media y organizaciones comunitarias durante el diseño de la exposición, concurso fotográfico regional, talleres de vinculación para estudiantes de enseñanza básica y media, y proyecto dirigido para los “buenos usos del agua” con estudiantes de enseñanza media. De estas actividades logramos evaluaciones que van desde buenas a muy buenas, además de aprendizaje sobre el segmento de estudiantes, donde fijamos con un límite inferior de 12 años sugerido para comprender y disfrutar la exposición a cabalidad. Paralelamente y de manera continua, mantuvimos un público de aproximadamente 750 personas conectadas gracias al instagram que contó con infografías e información periódica.

Los mayores alcances en cuanto a número se dieron durante la exhibición del proyecto que se mantuvo abierta todos los días de corrido durante tres meses, de manera gratuita y autoguiada, con un total de 14.764 visitas, superando las expectativas y proyecciones realizadas previamente. De estos números, hay 4.772 habitantes, 1.473 estudiantes de Cobquecura, 3.519 habitantes de la región del Ñuble y 5.884 turistas nacionales e internacionales. La evaluación de estos participantes, registrada en encuestas y en el libro de comentarios, es altamente positiva y valorable. Los conceptos que más se repiten son interés, nuevas perspectivas y conocimientos, responsabilidad ambiental, alto valor turístico de la región, rigurosidad de los contenidos y gratitud por la experiencia, mostrando una aprobación transversal por las temáticas y los enfoques mostrados.

Más aún, uno de los hechos que más llamó la atención a las autoridades locales fue el notable cuidado que ejerció la población que vive y trabaja en el sector donde se emplazó la muestra. Una de las principales amenazas al proyecto era tener esta exposición abierta en el sector de mayor afluencia de público de Cobquecura. Contra estos recelos, la exposición se mantuvo impecable, sin actos de vandalización durante todo el tiempo de emplazamiento, lo que atribuimos al importante sentido de pertenencia que generó en la población local.

Discusión

El interés que tiene la población, especialmente de zonas rurales, por temáticas relacionadas al agua, la megasequía y escasez hídrica es cada vez más notoria en un planeta donde el recurso hídrico escasea progresivamente, amenazando las reservas de familias y comunidades. A pesar de esto, una de las barreras para el aprendizaje y discusión en torno a estos temas es el academicismo propio de las fuentes de información disponibles. Este trabajo muestra que una forma de revertir este proceso es levantar temáticas desde y con las comunidades, además de realizar vinculación constante con diversos actores, para contribuir a una apropiación social efectiva del conocimiento.

Los proyectos realizados en comunas con bajos niveles educativos y sociales, como Cobquecura, tienen un alcance distinto. En estas comunas, los resultados educativos son inferiores al promedio nacional, y también hay una alta proporción de adultos mayores (Fawaz et al., 2022). Para abordar esta situación, es necesario crear relatos comprensibles y atractivos más allá de los enfoques educativos tradicionales. Las experiencias interactivas y multisensoriales, que involucran el tacto y el oído en una exposición autoguiada, permiten una actividad más inclusiva en términos de edad y educación. Probablemente también lo sea para incluir personas con discapacidades, como propusimos desde la postulación del proyecto, pero no tenemos cifras de público que avalen esta implicancia. Otra estrategia utilizada es presentar el relato de la exposición a través de ilustraciones y fotografías que logren transmitir el conocimiento científico, y dejando el texto como un elemento de apoyo, prescindible para la experiencia.

En el diseño del proyecto nos enfrentamos al desafío de mostrar la riqueza de la biodiversidad de la región y destacar su valor como patrimonio natural, al mismo tiempo que buscábamos sensibilizar sobre la fragilidad de la biodiversidad y su dependencia del recurso hídrico. Para lograr este propósito nos fue útil valernos de la fotografía profesional y la ilustración naturalista, que posiciona las especies en sus hábitat y resalta características que nos parecieron fundamentales.

Sin embargo, reconocimos que había otros aspectos que no pueden ser mostrados en fotografía, que son mucho menos conocidos y comprendidos por parte de la población, como el fascinante mundo del agua subterránea, invisible a simple vista. Conscientes de la importancia de acercar a las personas a este tema, encontramos en las ilustraciones científicas una herramienta efectiva para “visualizar lo invisible”. Un ejemplo claro de esto se evidenció en el panel del ciclo del agua, ubicado en el módulo interior de la exposición, donde a través de representaciones gráficas detalladas, testeadas con estudiantes, logramos transmitir de manera didáctica cómo el agua subterránea se incorpora al ciclo del agua. A pesar de esto, notamos una limitante en la edad para la comprensión de las ilustraciones, que muchas veces se hicieron muy complejas para estudiantes menores de 12 años.

En relación al impacto en los públicos objetivo, valoramos la importancia de involucrar a los estudiantes y permitirles ser parte activa de la narración. Un ejemplo destacado de esto es el proyecto denominado “Buenos Usos del Agua”, el cual culminó en la exposición de infografías elaboradas por los propios estudiantes, y los focus group junto a la prueba de materiales, donde pudieron opinar y decidir sobre temáticas a exponer. Con estas instancias, los participantes se convirtieron en “embajadores locales” del proyecto, apropiándose de la exposición. Su entusiasmo y compromiso no solo fortaleció su propio aprendizaje, sino que también generó un impacto positivo en su entorno, involucrando a familias completas en el cuidado y asistencia a la exposición.

En resumen, al involucrar a los estudiantes como protagonistas y permitirles contar parte de la historia, logramos no solo ampliar el alcance del proyecto, sino también potenciar su impacto educativo y social. Esta experiencia nos reafirma la importancia de fomentar su participación activa en iniciativas de divulgación científica, ya que no solo se convierten en agentes de cambio, sino que también contribuyen a la apropiación y difusión de los contenidos científicos entre sus pares y la comunidad en general.

Por otro lado, la suma de perspectivas y disciplinas diversas fueron clave para crear una muestra atractiva para personas con distintos niveles educacionales, edades, intereses y sensibilidades. Para este punto, valoramos especialmente mostrar perspectivas de la población local e incluir el arte de manera transversal en toda la iniciativa, como una disciplina llamativa que puede ayudar a las geociencias a ser más atractivas y comprensibles.

Conclusión

La escasez hídrica es una problemática socioambiental que requiere de los esfuerzos y trabajo en conjunto de profesionales de la ciencia, medio ambiente y la comunidad para encontrar soluciones y lograr una adaptación que permita la resiliencia. En ese sentido, proyectos de socialización del conocimiento que pongan en el centro la identidad de cada territorio en particular y sus poblaciones, en este caso la Región del Ñuble en cuanto a su biodiversidad, cuerpos de agua y habitantes, son una respuesta efectiva para generar apropiación social por parte de la comunidad. Por otro lado, se requieren esfuerzos conjuntos, donde se entremezcla la ciencia, el arte y la educación para lograr comunicar de manera efectiva conceptos que son vitales de ser entendidos por el espectro más amplio de la población posible, como el ciclo del agua y sus complejas interacciones, el concepto de cuencas hidrográficas y la ecología de diversos paisajes.

Palabras Clave: Divulgación científica, Educación ambiental, Ciclo del agua, Megasequía, Región de Ñuble.

Financiamiento: Este proyecto fue financiado por Concurso Nacional Ciencia Pública de Espacios Públicos Regionales del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación y ejecutado por Apacheta Geoturismo.

Agradecimientos: Agradecemos a Gisella Palma, Javiera Ruz y Antonia Pérez Wagner por las ilustraciones. A Vicente Méndez, Felipe Avilés, Matías Taucare y Rosa Troncoso por la revisión de contenidos.

Referencias:

- Assaraf, O. B. Z., & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 42(5), 518-560.
- Fawaz Yissi, M. J., Loyola Gómez, C., Rivas Maldonado, J., & Soto Villagrán, P. (2022). Configuración urbano-rural para el desarrollo de la Provincia de Itata, región de Ñuble, Chile. *Estudios Socioterritoriales. Revista De Geografía*, (32), 122.
- Fuentes, I., Fuster, R., Avilés, D., & Vervoort, W. (2021). Water scarcity in central Chile: the effect of climate and land cover changes on hydrologic resources. *Hydrological Sciences Journal*, 66(6), 1028-1044.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of hydrology*, 374(1-2), 162-170.
- SUBDERE, U. (2014). Línea Base, Consideraciones y Propuestas Técnicas para Determinar Pertinencia de Creación de Nueva Región de Ñuble. Informe Final. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
- Vargas-Payera, S., Taucare, M., Pareja, C., & Vejar, J. (2023). Improving school children's understanding of water scarcity with a co-produced book on groundwater in Central Chile. *Hydrogeology Journal*, 1-15.
- Yissi, M. J. F., Gómez, C. L., Maldonado, J. R., & Villagrán, P. S. (2022). Configuración urbano-rural para el desarrollo de la Provincia de Itata, región de Ñuble, Chile. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, (32), 122-122.

Geohuellas: Revista del Grupo de Geología Ambiental en proceso de transformación

Kristian Agurto-Velásquez¹, Hernán Bobadilla², Luna Pérez³

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Politecnico di Milano, Departamento de Matemáticas, Via Edoardo Bonardi 9, Milano, Italia

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) Región de Magallanes y la Antártica Chilena, Avenida Cristóbal Colón 441, Punta Arenas, Chile

"Geohuellas" es una revista de comunicación científica gestionada por el Grupo de Geología Ambiental (GGA) de la Sociedad Geológica de Chile. En ella, se presentan casos y discuten temas de interés medio ambiental, desde una perspectiva primordialmente geológica. La revista ha estado en actividad desde 2018 y cuenta con cuatro números publicados. Un quinto número está por publicarse hacia fines de 2023.

Recientes acontecimientos han propiciado la reflexión al interior del GGA respecto del futuro de Geohuellas. Entre los varios temas que han ameritado reflexión, dos merecen particular atención. El primero es la idoneidad del formato de Geohuellas. Miembros del GGA han cuestionado el impacto que una revista de comunicación científica, publicada en promedio una vez por año, puede alcanzar en el contexto comunicacional actual. Más explícitamente, el formato de revista parece estar fuera de sincronía con la concisión e inmediatez de los contenidos de redes sociales que tienen el más alto impacto mediático. El segundo tema que merece particular atención es el modelo de trabajo que permite el funcionamiento de Geohuellas. La revista ha sido gestionada mediante una subcomisión del GGA, cuyos miembros tienen el carácter de voluntarios. Dados diversos diferenciales en términos de disponibilidad y motivaciones, el trabajo ha sido poco eficiente, destacando la falta de compromiso en las actividades convenidas.

En pos de abordar estos dos problemas, la subcomisión de Geohuellas – y el GGA en general – han propuesto las siguientes modificaciones. Respecto de la idoneidad del formato, Geohuellas haya expandido el alcance de su impacto mediante: i) la publicación de sus artículos en el sitio web de la Sociedad Geológica de Chile, con antelación a la publicación formal de la revista, a la tasa de un artículo por mes; y ii) la publicación de contenidos asociados a los artículos en redes sociales del GGA, e.g., Instagram y Twitter. De esta forma, se prevé que Geohuellas pueda persistir como revista junto a la complementación de comunicaciones por otros medios. Respecto del modelo de trabajo, se sugiere que la subcomisión de Geohuellas siga funcionando de forma voluntaria, pero en base a olas de liderazgo. Más explícitamente, se prevé promover la inserción de estudiantes de posgrado cuya investigación lidie con temas medioambientales (sin necesidad de excluir la presencia de miembros más experimentados). La idea es que la cohorte saliente inspire y motive a nuevos estudiantes de posgrado para formar parte de la cohorte entrante, generando así ciclos de trabajo con nuevas motivaciones, objetivos, y metodologías.

Palabras Clave: Geología Ambiental, Divulgación, Geohuellas.

“Nosonsólorocas”: Experiencias de educación y divulgación geológica hacia la comunidad a través de métodos didácticos y lenguaje simplificado

Guillermo Berríos Pentenero¹, José Joaquín Figueroa Ruiz¹, Nicolás Cáceres¹, Jorge Torres¹, Eduardo Navarrete¹

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Valdivia, Chile

‘Nosonsólorocas’ es un grupo de divulgación geológica, cuya principal misión es transmitir información geocientífica a la población, mediante la generación de contenido gráfico y audiovisual en redes sociales; además de la realización de charlas y capacitaciones presenciales. Este grupo nace de la necesidad que existe, particularmente en Chile, de informar a las personas sobre los distintos procesos geológicos que formaron (y aún forman) nuestro país; todo esto mediante un lenguaje simple, didáctico e interesante. El principal objetivo de esta página es disminuir las brechas de conocimiento sobre la geología que existe en la mayoría de la población chilena. Esto podría traer repercusiones positivas, como por ejemplo aumentar la valoración de entornos naturales, reconocer zonas de peligro geológico (depósitos de aluviones, terrazas fluviales, lahares, avalanchas, entre otros) y mejorar el ordenamiento territorial.

Para lograr llegar a un público amplio dentro del espectro juvenil-adulto joven, la divulgación del contenido se realiza principalmente en la red social Instagram, mediante publicaciones y reels. Las publicaciones se dividen en dos ramas temáticas: Geositios (fondo azul) y Educación geológica (fondo naranja). Los geositios se han seleccionado mediante el análisis del interés que despierta en la comunidad, divulgando información de sectores como Torres del Paine, hasta La Portada de Antofagasta, explicando atracciones populares por distintas latitudes de nuestro país. Por su parte, en el área de educación geológica, se da a conocer información básica geológica, tales como tipos de rocas, procesos geológicos, entre otros. Los reels, en cambio, abarcan áreas geológicas de todo tipo, siendo más transversales y llamativos para la comunidad. Estos abarcan principalmente explicaciones en terreno de distintos geositios en los que hemos investigado (e.g. Batea Mahuida, Laguna del Maule- Valle de los Cóndores, Valle de Cochamó, entre otros).

Dentro de los 19 meses aproximadamente en que se ha desarrollado el proyecto, la página de Instagram ha logrado captar ~2650 seguidores, incluso, han habido publicaciones que han alcanzado las 25 mil visitas. Se ha demostrado que el método de comunicación ha sido bien recibido por el público general. Por otro lado, hemos realizado capacitaciones de volcanología básica, geomorfología fluvial y glacial en Pucón en conjunto con Antü Pucón Capacitaciones, realizando clases tanto teóricas como prácticas. En esta misma comuna, también desarrollamos talleres geológicos didácticos en el colegio Kairos a niños de 8 - 17 años. Por otra parte, la vinculación con comunidades altamente vulnerables a procesos geológicos ha sido importante, principalmente con poblaciones en sectores de la cuenca del río Maule, en donde se han realizado charlas acordes a la realidad del sector, en colaboración a la Seremi de Salud del Maule, en donde se ha dado énfasis a los riesgos geológicos y cómo estos se han relacionado con la comunidad en su día a día, generando instancias de reflexión y de aprendizaje mutuo.

En el corto a mediano plazo, nuestra meta es continuar entregando contenido de calidad de los distintos geositios de nuestro país, llegando a sectores en donde poseen un gran potencial geoturístico y, por consiguiente, potenciar a dichas comunidades aledañas a generar una vinculación con su entorno y en lo posible, desarrollar herramientas que les permitan potenciar el turismo local en base a la riqueza geológica del sector. Además, se buscará la ampliación de la presente iniciativa a distintas redes sociales, con la finalidad de abarcar más el espectro social al que se enfocarán los próximos contenidos, intentando así abarcar la totalidad del espectro social chileno.

Por último, este proyecto busca mostrar el trabajo realizado en redes sociales y con las comunidades en las cuales hemos realizado divulgación, compartiendo de esta manera las distintas experiencias en estas actividades de difusión bajo el contexto de las distintas comunidades. De esta forma, ayudamos a preparar el terreno para que, en un futuro, sean más las personas con conocimientos geológicos en nuestro país.

Palabras Clave: Geositios, Redes sociales, Divulgación, Educación, Contenido Audiovisual.

Experiencias de divulgación científica a público general a través del levantamiento de una Ruta GeoAmbiental en la Reserva Nacional La Chimba, Antofagasta

Daniela Calderón Guerra¹, Álvaro Sarmiento¹, Rinat Leyton¹, Oscar Troncoso¹

(1) Núcleo Geológico Norte, Área Divulgación, Antofagasta, Chile

1. Introducción

La Reserva Nacional La Chimba (RNLC) es un área silvestre protegida por el estado, ubicada en el borde occidental de la Cordillera de la Costa, a 15 km de la ciudad de Antofagasta (ca. 23°S - 70°W), a una altura entre 270 - 1070 m s.n.m. La reserva posee dos drenajes principales: Quebradas La Chimba y Quebrada Guanaco. La RNLC forma parte del Desierto Costero de Tocopilla y alberga una notable biodiversidad con 185 especies identificadas, incluyendo flora y fauna nativa y endémica característica del norte de Chile (Mora-Carreño et al., 2022). La ubicación de la RNLC hace que sea un excelente sitio para observar la geología representativa de la cordillera de la costa y los procesos erosivos costeros asociados a ella.

Las rocas que predominan en el paisaje son de origen volcánico-continental, y pertenecen a la Formación La Negra del Jurásico Inferior hasta el Jurásico superior (García 1967). Esta Formación está compuesta principalmente por andesitas con variaciones texturales porfídicas, afaníticas, amigdaloides y brechosas, las cuales son instruidas por diques félsicos asociados a las Dioritas Cuarzíferas y Tonalitas de Mantos de Varas del Jurásico superior la cual aflora al norte del área. Además es posible observar cubiertas sedimentarias a lo largo de todas sus quebradas, y en menor medida algunas rocas químicas como sales y carbonatos.

El área previamente descrita fue reconocida como reserva nacional bajo el decreto N°71 de 1988 con el fin de promover su restauración basándose, en ese entonces, en su importancia para la biodiversidad, el patrimonio arqueológico, la recreación y la investigación científica (CONAF, 1995). Es importante incorporar la geología para lograr el entendimiento integral de los ecosistemas, ya que son las características geológicas del territorio las que disponen los recursos hídricos y climáticos para que se genere la vida. Es decir, la geodiversidad es el dispositivo base para la biodiversidad.

Las mayores amenazas en la Reserva Nacional La Chimba y sus territorios de alrededor (como lo es el barrio transitorio La Chimba) son los efectos antrópicos, entre ellos está la extracción de rípios, la formación de vertederos ilegales e incluso la ubicación de un ex vertedero municipal y actual relleno sanitario. También se debe tener en cuenta que, pese a ser un área silvestre protegida, no cuenta con la presencia de guardaparques o autoridades territoriales para la fiscalización, permitiendo el mal uso de senderos, alimentación de la fauna, presencia de basura y escombros, uso de fogatas, personas pernoctando en el lugar, práctica de deportes, entre otros.

Frente a estas problemáticas, se desarrolló el “Plan de Recuperación de la Reserva Nacional La Chimba” (2019-2020), a través del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R) e implementado por la Universidad Católica del Norte en colaboración con CONAF. Este plan contribuyó a la recuperación del área protegida a través del mejoramiento de infraestructura, investigación y educación ambiental. Para desarrollar un enfoque que incluyera la geodiversidad, se estableció una alianza entre el Proyecto FIC-R y el Núcleo Geológico Norte (NGN), una corporación enfocada en la puesta en valor de la geodiversidad local y la promoción del conocimiento de las Ciencias de la Tierra con la comunidad. Esta alianza en particular generó como productos dos paneles descriptivos de la geodiversidad instalados en la RNLC, así como también dos videos para NNA y adultos, respectivamente (Sarmiento et al, 2021).

Adicionalmente, se desarrolló un proyecto por Núcleo Geológico Norte, correspondiente a Rutas GeoAmbientales, las cuales son presentadas de forma inédita en este resumen.

2. Metodología

Para poder generar las Rutas GeoAmbientales fue necesario realizar los siguientes hitos:

1. Pre-terreno, el cual consistió en la revisión de bibliografía y de imágenes satelitales, en búsqueda de posibles sitios de interés.
2. Terreno, el cual permitió identificar, en la Quebrada La Chimba, los sitios en los cuales los elementos de la geodiversidad fueran reconocibles.
3. Priorización, etapa en la cual se consideraron los sitios identificados y se seleccionaron con el fin de que permitieran explicar conceptos geológicos y de evitar redundancias.
4. Guión Divulgativo, etapa en la cual se generó un relato que considerara los sitios seleccionados, que permitiera la explicación de conceptos desde lo general (Ej. Tiempo geológico) hasta lo particular (Ej. Elementos geológicos como diaclasas). Se apuntó a que este guión fuera “interpretativo” en el sentido de IUCN (Crofts et al., 2020), es decir, que no sea sólo expositivo sino que permitiera al público poder comprender las relaciones entre los elementos.
5. Prueba de ruta, en la cual se evaluó el guión con un grupo acotado con el fin de poder corregirlo.

También se levantó una evaluación de percepción para el público asistente a la experiencia, la cual fue realizada mediante encuestas de carácter confidencial (con respuestas no individualizadas) basada en la escala de Likert de 1-7. A esta encuesta también se incorporaron preguntas sobre el nivel de conocimiento previo y posterior de los/as participantes sobre contenidos de la geología de la RN La Chimba con el objetivo de poder cuantificar la apropiación de los conocimientos adquiridos en la actividad.

3. Resultados

3.1 Ruta GeoAmbiental RN La Chimba

El principal insumo del trabajo fue la creación de una Ruta GeoAmbiental en la RN La Chimba con su respectivo guión divulgativo de carácter interpretativo. Esta ruta se realiza a través del sendero Mirador, que se encuentra en la quebrada La Chimba dentro de la RN La Chimba y fue implementado en el "Plan de Recuperación de la Reserva Nacional La Chimba" (2019-2020) por lo que cuenta con señalización, un sombreadero y un mirador que marca el final del sendero.

La Ruta GeoAmbiental cuenta con 11 puntos de parada que inician en la entrada principal y finalizan en el Mirador con una vista panorámica de la ciudad de Antofagasta. Tiene una duración de aproximadamente 4 horas y corresponde a un trekking de intensidad media.

A través de los 11 puntos que componen la ruta, se contextualiza a los/as participantes sobre qué es una Reserva Nacional, el trabajo de CONAF, por qué la RN La Chimba adquirió ese título, su historia geológica y la geodiversidad que se puede observar.

Para una mejor comprensión de la información, se realizan actividades interpretativas y ejercicios prácticos para que los/as beneficiarios/as tengan una mejor apropiación de los conocimientos. Se hizo especialmente énfasis en que se comprendieran los conceptos de tiempo geológico (con un ejercicio de escala), subducción, rocas volcánicas, diaclasas, tafonis y geodiversidad, los cuales son relevantes y destacan en la ruta elegida. También forman parte importante de la ruta elementos de flora y fauna endémica que sobresalen en una cadena montañosa que, por lo general, los/as ciudadanos/as consideran carentes de vida.

3.2 Encuesta de evaluación sobre el apropiamiento de conocimientos al realizar la Ruta GeoAmbiental

El segundo insumo generado a partir del trabajo en la RN La Chimba fue una encuesta para evaluar la apropiación de los conocimientos en el público. Al momento de generar la ruta, se hizo una selección y priorización de conceptos que se consideraban relevantes para comprender la historia y riqueza geológica de la RN La Chimba y sus alrededores. Por lo tanto, al momento de la ejecución fue importante determinar si efectivamente los/as participantes comprendieron y asimilaron los conocimientos, así como la importancia de incorporar el término "geodiversidad" al momento de hablar de conservación de una zona.

Para lograr determinar el grado de asimilación de conocimientos de los/as participantes se realizó una encuesta previa a la ruta GeoAmbiental y otra encuesta posterior a la actividad. La encuesta previa permite conocer cuánto saben los y las participantes antes de vivir la experiencia de la visita, que conceptos relevar y cuanto es posible ahondar con el público a lo largo de la excursión. Mientras que la encuesta de salida nos indica el grado de asimilación de los conceptos trabajados.

Se incorporan además, preguntas para conocer el grado de satisfacción de los/as participantes con respecto a la actividad con el fin de poder adaptar futuras rutas a los requerimientos de los/as usuarios/as.

Esta encuesta será adaptada a todas las actividades de la organización para recopilar una línea base sobre los conocimientos sobre ciencias de la Tierra de los/as participantes y el nivel de impacto que tienen las actividades de divulgación para la educación de la población.

3.3 Resultados encuesta de evaluación (Posicionamiento de la geodiversidad)

Los resultados de la primera encuesta aplicada en la Ruta GeoAmbiental de la RN La Chimba expuso que más del 50% de los/as participantes no conocía esta Reserva. Mientras que el concepto de "geodiversidad" había sido escuchado previamente a la actividad por casi el 60% de los/as usuarios/as. Este resultado positivo en cuanto al posicionamiento del concepto de "geodiversidad" nos parece coherente con el público que asistió a la actividad, el cual ya había participado en otras actividades con el Núcleo Geológico Norte.

En cuanto a la asimilación de conocimientos, la Figura 1 muestra una nube de palabras levantada a partir de la pregunta: *Con respecto a lo aprendido ¿Qué palabras o términos sobre ciencias de la Tierra podría nombrar?*. Los resultados obtenidos encajan con los conceptos priorizados al momento de levantar el guión educativo para la ruta GeoAmbiental donde resaltan: Subducción, Tafoni, diaclasas, diques y geodiversidad. Estos elementos geológicos son los que se destacan en la historia de la RN La Chimba, por lo que se puede considerar que hubo una buena asimilación de los contenidos por parte de los participantes al finalizar la ruta.

Finalmente, podemos ver en la Figura 2 los resultados de la encuesta de satisfacción que respondieron los/as participantes al terminar la actividad. Cada pregunta fue evaluada con notas entre 1 y 7, donde 1 representa la mayor insatisfacción y 7 representa una experiencia totalmente satisfactoria. Se puede observar que los/as participantes quedaron muy satisfechos con la actividad, les permitió adquirir mayor cantidad de conocimientos en relación a la Geología y Geodiversidad, les pareció adecuada la organización, les permitió conocer el territorio que habitan y les pareció adecuado el lenguaje utilizado. Todos estos elementos permitieron que se asimilaran de mejor forma los conocimientos relevados.

4. Proyecciones

Junto con el trabajo de divulgación realizado en las Rutas GeoAmbientales a la Reserva Nacional La Chimba, se generaron instancias de educación para la correcta conservación de los espacios naturales. En estas instancias se enseña a la comunidad sobre conceptos de geología (geopatrimonio, geoformas, escalas de tiempo y espacial, subducción, entre otras cosas), además de reeducar sobre la correcta protección de estos espacios naturales indicando las Normas y Recomendaciones que entrega CONAF.

Diálogos en Movimiento: Geoecología y Comunidad en torno al estero Nonguén (Barrio Puchacay, Concepción)

Mauricio Espinoza Vargas¹⁻², Verónica Jessen Reyes²⁻³, Claudio Navarrete Hidalgo², Ariana Bertín Benavides³, Darío Sandoval Maldonado², Fernanda Arriagada Vásquez², Organización Asamblea Puchacay², Centro Cultural Teatro Oráculo²

(1) Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

(2) Asamblea Puchacay, Barrio Puchacay, Concepción, Chile

(3) Conciencia Sur, Concepción, Chile

El estero Nonguén y su cuenca representan un lugar de gran valor cultural, ecosistémico y geológico para la comunidad del Barrio Puchacay, Concepción. Parte de estos valores son desconocidos por gran parte de la población aledaña, traduciéndose en un deterioro del espacio público cercano al estero, convirtiéndolo en un sitio de acumulación de basura doméstica, escombros y microtráfico. Lo anterior ha generado un alejamiento y pérdida de vínculo de la comunidad con el estero.

El paisaje de la cuenca está marcado por el desarrollo de cerros y valles, cerros boscosos formados sobre rocas graníticas de edad paleozoica (Tonalita Palomares), y un valle fluvial construido por el Estero Nonguén en su recorrido hacia el río Andalién. Asimismo, en el estero se reconoce una rica biodiversidad, observándose numerosas especies de aves tales como chucao, huedhued, rayadito, cachudito, etc. Además, aún se encuentra un relicto del bosque caducifolio y numerosas especies de peces endémicas las cuales presentan un alto nivel de resiliencia frente a la intervención humana (Ortiz-Sandoval, et al. 2009).

Los sectores urbanos se emplazan en la planicie de inundación del río, desarrollándose una serie de fenómenos de riesgo geológico (inundaciones, licuefacción, remociones en masa, etc.), los que han sido vividos históricamente como desastres por la población. Algunos ejemplos particularmente intensos son la inundación fluvial del año 2006, la que dejó un total de 8000 damnificados en Concepción (ONEMI, 2006); los fenómenos de licuefacción post-terremoto del Maule de 2010 que produjeron numerosos socavones, grietas y hundimientos de viviendas (Falcon, 2012). Estos eventos han dejado una impronta indeleble en la memoria local, siendo transmitidos por generaciones y se reconocen como fundamentales en el desarrollo de la resiliencia de la comunidad aledaña al Estero Nonguén. De esta manera, el Estero Nonguén y su cuenca presentan una confluencia de características culturales, ecosistémicas y geológicas que presentan una retroalimentación clara con la intervención humana y el modo de habitar de las comunidades aledañas. Esta complejidad sistémica vuelve adecuado un enfoque geoecológico para la comprensión de la relación entre el medio geológico, la hidrosfera y la biosfera, que evalúe el impacto humano en torno al sistema del Estero Nonguén y apunte hacia una gestión responsable y comunitaria de la cuenca.

Este proyecto se ha propuesto promover un diálogo horizontal entre la comunidad local que habita la cuenca del Estero Nonguén, la comunidad científica e instituciones públicas en torno a distintos ejes temáticos de la geoecología del río: i) Biodiversidad y conservación, ii) Riesgos geológicos, y iii) memoria local. El objetivo principal consiste en promover la revinculación territorial y comunitaria con el Estero Nonguén y su ecosistema, mediante un diálogo de saberes locales y científicos, para fomentar la gestión y conservación de este ecosistema natural.

Para alcanzar este objetivo, se han generado diálogos de saberes entre la comunidad científica y las comunidades aledañas al Estero Nonguén. El público objetivo han sido niñas/os y las/os adultos/as de los barrios aledaños a la parte media del Estero Nonguén, donde se ha trabajado con actores claves del territorio: juntas de vecinos, escuelas y colegios del sector. Además, numerosas organizaciones socio-ambientales se han articulado en torno al proyecto para ir produciendo experiencias significativas que permitan integrar los resultados de investigaciones científicas, experiencias organizacionales y saberes locales. La intención ha sido tensionar múltiples miradas en torno a la memoria y saberes acerca de la geoecología del Estero Nonguén.

Las metodologías han sido estructuradas en tres etapas: (1) mapeo colectivo de adultos/as y la realización de murales en niñas, niños y adolescentes, (2) salidas a terreno al río donde se ha estimulado un diálogo horizontal entre la comunidad local y científica y (3) experiencias memorables que comprendan intervenciones directas del espacio (e.g. jornada de arborización de la ribera del río) como también expresiones artísticas y culturales (e.g. realización de obra de teatro acerca de la identidad en torno al río). Se espera generar un mapa que incorpore aspectos de la geoecología (biodiversidad, riesgo geológico, etc.) y sitios de valor identitario de la comunidad, así como un registro audiovisual que sirva de bitácora para las organizaciones participantes. Además, se busca una asimilación de los resultados desde distintas dimensiones cognitivas y emocionales, permitiendo una socialización efectiva del conocimiento que promueva una gobernanza de las comunidades en la gestión de la conservación y restauración de su territorio.

Palabras Clave: Geoecología, Puchacay, Concepción, Riesgo geológico, Comunidad.

Financiamiento: Proyecto Ciencia Pública CP22-C005 (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación).

Agradecimientos: Agradecemos a las JJVV de Puchacay-Nonguén, a las escuelas Lagos de Chile y Lautaro, a Conciencia Sur, Entorno Educativo, y GEF Humedales Costeros. Agradecemos al Proyecto Ciencia Pública CP22-C005.

Referencias:

- Falcón, M.F, et al. 2012. Peligro de licuefacción: Área Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante. Región del BioBío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, 1 mapa escala 1:50.000.
- ONEMI, 2006. Informe del Sistema Frontal del 10 al 13 de Julio de 2006. Departamento de Protección Civil, septiembre de 2006.
- Ortiz-Sandoval, Juan J., et al. (2009) Respuesta de la comunidad de peces al dragado de ríos costeros de la región del BioBío (Chile). Gayana (Concepción) 73.1 (2009): 64-75.

Divulgando geociencias por contrabando: como la narración de historias entretenidas permite llegar a un amplio público

Cristian Fariás Vega¹

(1) Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 02959, Temuco, Chile

Explicar conceptos complejos de ciencias de la Tierra es un desafío complejo, ya que implica salir de la zona de confort al momento de comunicar, entendiendo cuáles son los públicos a los que se quiere llegar. En ese sentido, las redes sociales han permitido la aparición de diversos comunicadores que han podido tener mucho impacto en todo el mundo, con mensajes simples, directos, y con alto contenido de humor. En esa línea, presento los resultados de mi propia experiencia divulgando ciencias de la Tierra (más específicamente sobre terremotos y volcanismo) en los últimos años, a través de redes sociales, medios de comunicación masivos, y también mediante libros escritos. La mayoría de la divulgación la he realizado a través de twitter, en la cuenta @cfariasvega, mientras que la fase de escritura más reposada ha sido realizada primero en forma de columnas en el diario La Tercera, y luego con la publicación de los libros "Volcanes y Terremotos" (2021) y "Un Manual para sobrevivir a nuestra loca geografía" (2023).

Los resultados de esta experiencia muestran un fuerte crecimiento tanto en el número de seguidores en redes sociales como en el nivel de *engagement* dentro de ella. Asimismo, se ve una evidencia de un público que busca activamente comprender procesos de la Tierra, junto a otro más pasivo, que busca tener información al momento de que ocurre algún evento más extremo (como un sismo perceptible). La evidencia muestra también que existe una fuerte preferencia de parte del público hacia el contenido con fuertes dosis de humor, lo que después se ha visto trasladado a los buenos números de ventas de libros que tienen un lenguaje simple, liviano, pero sin perder el rigor de la información. Este alto impacto sugiere que la metodología de narrar historias divertidas acompañadas de un contexto científico en un segundo plano tiene una buena acogida. Resulta interesante verificar que esto ocurre en distintos grupos etarios, lo que sugiere que existe una fuerte transversalidad en cuanto a la recepción de este tipo de formas de comunicación.

Palabras Clave: comunicación, terremotos, volcanes, ciencias de la tierra, redes sociales.

Experiencias de divulgación científica de Sernageomin: Celebraciones del Día de la Geodiversidad (6 de octubre) y Día del Agua (22 de marzo)

Felipe Cristian Fuentes Carrasco¹, Manuel Arenas¹, Cristóbal Machuca del Valle¹, Nicolás Mendoza²

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)

(2) Civrur 39. Centro Interactivo Vulcanológico de la Araucanía, Temuco, Chile

Con el fin de dar valor al papel de la Geología en la sociedad actual y promover la conservación del patrimonio geológico, la Unesco estableció que el 6 de octubre sea el Día Internacional de la Geodiversidad. Esta celebración comenzó de manera oficial el año 2022 y como Sernageomin, mediante su unidad de Geopatrimonio, se impulsa la celebración de la primera Feria de la Geodiversidad, en la terraza Caupolicán del Cerro Santa Lucía. Ésta consistió en una actividad interactiva, donde mediante 11 módulos se mostró a los participantes distintos aspectos de las ciencias de la Tierra, en particular, de aquellas áreas relacionadas con el Plan Nacional de Geología, la Red Nacional de Vigilancia Volcánica y el departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos. Además, los estudiantes de diversas instituciones educacionales de las municipalidades de Santiago y de Ñuñoa pudieron recibir una visita guiada por los stands de la feria, donde pudieron realizar la actividad de un "Viaje al Centro del Volcán", donde mediante lentes de realidad virtual, los participantes pueden simular estar dentro de una nave y entrar al interior de un volcán activo. También pudieron ver una maqueta del volcán Villarrica, que con tecnología del videomapping, permite ilustrar una animación y relato de varios riesgos volcánicos. Además, los asistentes interactuaron con maquetas hidrogeológicas, de flujos de detritos, de usos industriales de la geotermia, muestrarios de rocas y minerales, y una colección de maquetas y elementos adaptados para personas con discapacidad visual, con información en relieve y en lenguaje braille. Adicionalmente, los asistentes pudieron participar en Geotours, donde mediante un(a) guía geólogo(a), pudieron recorrer los atractivos geológicos y científicos del cerro Santa Lucía y visitar 6 geositos a los que se puede acceder de manera virtual en la página:

<https://www.sernageomin.cl/cerrosantalucia/>

Por otra parte, en el marco de la celebración del Día Internacional del Agua (22 de marzo), la unidad de Hidrogeología del Sernageomin, este año 2023, realizó un taller informativo en el Parque Forestal, frente al museo de Bellas Artes, donde antiguamente existía la laguna Forestal y por donde pasaba el río Mapocho antes de la urbanización de Santiago. En la oportunidad, los transeúntes pudieron informarse respecto al pasado del río Mapocho; el Ciclo del Agua; el acuífero de la Hoya de Santiago, y los tipos de glaciares con énfasis en los de roca.

El lema del día agua para este año fue "Sé el cambio que quieres ver en el mundo", y por lo tanto, la actividad tuvo como objetivo la divulgación del curso de agua más emblemático de la capital, para que los transeúntes se informaran sobre la evolución que ha tenido el río Mapocho, así como también contarles sobre su origen, en las aguas de los glaciares y glaciares de roca de la parte alta de la cuenca.

También se ilustraron cómo son los acuíferos que se encuentran en el relleno sedimentario de la Hoya de Santiago. Se presentaron maquetas 3D e infografías para que las personas vieran cómo funciona un acuífero y cómo son los glaciares de roca, y entender la importancia y el funcionamiento de los distintos componentes del ciclo de agua en la subcuenca del río Mapocho". Esta maqueta se puede visualizar en:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZfNDvQ5iTMU>

Hacer actividades de divulgación en los días internacionales de la Geodiversidad y del Agua son una herramienta importante y una oportunidad para acercar las ciencias geológicas y en particular los temas referentes al agua, como son los glaciares y glaciares de roca, para poder reflexionar sobre todos los aspectos de nuestro día a día que no serían posibles sin este vital elemento. Asimismo, para lograr avanzar como sociedad, la discusión y los desafíos pasan por preguntarnos qué medidas podemos tomar hoy, mientras enfrentamos la crisis hídrica en un contexto de cambio climático y de sostenida mega sequía que afecta al centro norte de nuestro país

Uno de los objetivos específicos del Sernageomin es acercar las ciencias de la Tierra a las comunidades, por lo que realizar estas actividades de divulgación, que incluyen actividades lúdicas, interactivas y novedosas para el público, permiten hacer una entrega efectiva del conocimiento, sin distinción y de manera inclusiva, para todas y todos.

Palabras Clave: Divulgación científica, Geodiversidad, Agua, Geopatrimonio, Educación geológica.

Rocadictos: Gestión de contenidos entre geocientíficos y periodistas

Rodrigo López¹, Daniela Cid², Valentina Flores¹, Daniel Díaz², Alida Pérez¹, Javier Ojeda², Rodrigo Fernández¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Almirante Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

Rocadictos es un programa radial que nació en julio de 2019 como una iniciativa colaborativa entre la Radio Universidad de Chile, los departamentos de Geología y Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia, del mismo plantel. Considerando su esfuerzo por acercar las geociencias al público general, en este trabajo se describen los principales desafíos de gestión que ha debido enfrentar el programa en sus cuatro años de historia y cómo estos se conjugan en el eje editorial-contenidos-audiencia para lograr un resultado potente en términos de público.

En primer término, considerando las restricciones editoriales, se describe la estructura original del programa: Noticias, donde comentamos hechos noticiosos ocurridos durante la semana; Contacto telefónico, en el que se toma contacto con investigadoras e investigadores para tratar temas específicos y acotados, muchas veces contingentes; Entrevista principal, donde se desarrolla el tema central del capítulo junto a un investigador o investigadora principal; y, por último, la sección de Recomendaciones, donde se difunden iniciativas científicas y culturales, como libros, documentales, exposiciones, entre otros. Esta información va acompañada de música, respetando el 20% mínimo de música chilena en nuestra programación, relacionada al tema central desarrollado.

Posteriormente se detallan las funciones y responsabilidades del Comité editorial como órgano decisorio, las acciones de marketing/comunicación para dar visibilidad y amplitud al programa, y los ejes editoriales que marcan la forma en que ROCADICTOS ofrece contenidos de interés público, con muchos de ellos presentes en la agenda noticiosa, como por ejemplo: eventos geológicos como terremotos y erupciones volcánicas, recursos naturales (metales, litio, energías renovables), fenómenos y eventos asociados al cambio climático, entre otros.

Para finalizar, se detallan los esfuerzos para encaminar los contenidos del programa hacia nuevas plataformas y puestas en escena (podcasts, seminarios), siempre con el objetivo de ampliar su público, vincular su pauta a la agenda noticiosa y ofrecer una plataforma útil y amena para, no solo divulgar las ciencias de la Tierra y aumentar la presencia de científicos de la Tierra en medios de comunicación, sino que también para contribuir a comprender la influencia de la Tierra sobre la población y la manera en que la sociedad humana es capaz también de alterar los procesos terrestres. Así, Rocadictos es un programa que promueve la comprensión científica actual y correcta de las Ciencias de la Tierra, la cual es fundamental para contribuir a una ciudadanía responsable con el planeta y sus recursos.

Palabras Clave: Radio Universidad de Chile, comunicación radial, divulgación científica, gestión de contenidos, Rocadictos.

Financiamiento: Departamento de Geología, Departamento de Geofísica, Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia, Núcleo Milenio Paleoclima, Núcleo de Geofísica Aplicada, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes.

Agradecimientos: A cada una de nuestras invitadas e invitados y periodistas y panelistas. Especial agradecimiento a las estudiantes Camila Rodríguez, Camila Zúñiga, Nicole Zárate y Karina Berrios.

Experiencias en el uso de maquetas para la enseñanza y divulgación de las Ciencias de la Tierra: Perspectivas desde el público y el expositor

Nicolás Mendoza¹, Francisco Bucchi¹, Francisca Aguilera², Felipe Fuentes³

(1) Geoimagen, Padre Las Casas, Chile

(2) Apacheta Geoturismo, Santiago, Chile

(3) SERNAGEOMIN, Departamento de Geología Aplicada, Santiago, Chile

Los últimos años han presenciado avances significativos en la incorporación de tecnología en la enseñanza de las geociencias. La utilización de material concreto ha evolucionado a maquetas topográficas, cajas de arena de realidad aumentada, simulaciones interactivas y visualizaciones en 3D mediante la técnica de videomapping. Estos elementos han enriquecido la experiencia de aprendizaje, generando un grado de interacción más profundo y volviendo la experiencia más atractiva, accesible y multisensorial para público de todas las edades y zonas. Además, han facilitado la exploración de fenómenos geológicos complejos y brindado oportunidades para el descubrimiento y la experimentación. Esto llevó a que varias iniciativas se dediquen a la creación de material divulgativo, uno de ellos es Geoimagen, a la fecha ha entregado más de 20 maquetas a diferentes organizaciones. Además de innovar en el uso de técnicas audiovisuales como el Video Mapping, alcanzando una mejora en los métodos de divulgación.

Sobre el aprendizaje del público, los modelos 3D tienen efectos significativos, ofrecen una experiencia tangible y estimulan los sentidos. En particular, en un mundo donde a los niños, generalmente se les prohíbe tocar o interactuar con el material, permitir una estimulación sensorial añadida, al interactuar a través del tacto, es gratamente recibido por ellos. Además, estas experiencias facilitan la comprensión de conceptos abstractos y mejora la retención de información relacionada con la topografía. La novedad del 3D juega un papel crucial en el impacto que generan al ser una forma innovadora de presentar información cartográfica. La participación de público de todas las edades es estimulada y permite una divulgación científica inclusiva, teniendo fuerte impacto en segmentos con poca alfabetización digital (tercera edad-zonas rurales), quienes no pueden acceder a plataformas digitales como Google Earth. Además, al diferenciarse del clásico panel con imágenes y texto, se puede acceder a personas con discapacidad visual o que no saben leer.

El impacto en los expositores es relevante, nuestras encuestas indican que contar con maquetas resulta gratificante. Para aquellos sin experiencia en geociencias, trabajar con herramientas concretas genera confianza, facilita la explicación y la comunicación de los eventos del territorio, aumentando la credibilidad de los expositores. Contar con herramientas consideradas valiosas genera un sentido de orgullo, ya que demuestra el esfuerzo de los expositores por innovar y mejorar las condiciones para la enseñanza. El aspecto emocional también se ve beneficiado ya que una situación recurrente es el entusiasmo de los niños frente a estas herramientas, esta interacción expositor-herramienta-público genera satisfacción en los expositores.

Según indicadores levantados, la maqueta solicitada por Apacheta geoturismo, de la región del Ñuble, usada en el proyecto Ciencia Pública "Viaje por el río Itata", fue evaluada con el semáforo de la metacognición quedando en el 1er lugar v/s el resto de la exhibición que consiste en paneles didácticos. Otro ejemplo es el uso de la caja de arena de realidad aumentada en las ferias de divulgación volcánica del SNGM, este desarrollo ha sido uno de las mejores evaluadas por el público dentro las actividades presentadas. En estas mismas ferias las maquetas se han utilizado en la proyección de mapas geológicos y peligro volcánico, logrando la comprensión de estos, debido a la complejidad que significa tener información 2D que al ser llevada al 3D es más intuitiva. Por otra parte, una de las últimas maquetas realizadas, de un glaciar de roca, de la región de Coquimbo, ha sido utilizada por SNGM en diversas actividades este año (día del agua- del Patrimonio- V Congreso de la SOCHICRI), donde fue posible acercar el conocimiento de los glaciares a la comunidad, a distintas edades tanto científicos como público general, en todas las actividades se recalcó la facilidad de entender la crioforma, agradeciendo por el impacto visual que tiene la maqueta así como la posibilidad de poder interactuar con la maqueta.

La innovación en divulgación es crucial para lograr un impacto significativo en el aprendizaje en diversos públicos, en especial el segmento de la primera infancia y el escolar, que, debido a los avances tecnológicos en el mundo, demandan que la forma de enseñar sea cada vez más innovadora y estimulante para los sentidos. La generación de material concreto y el uso de tecnologías avanzadas permiten una experiencia de aprendizaje más inmersiva y significativa, tanto para el público como para los expositores. Estas herramientas estimulan la curiosidad, generan confianza, motivación, orgullo y facilitan la divulgación científica en diversos segmentos de la población.

Palabras Clave: comunidad, 3D, innovación, Maquetas, Tacto.

Referencias:

- Instagram: [@Geoimagen](#)

El arte del SIG: explorando la intersección de GIS, los mapas y el arte

Roberto Larregla Maldonado¹, Nicolás Mendoza Vivallo¹

(1) Geoimagen Spa, Palermo PC 8 Lote 2-2, Padre las Casas, Chile

A lo largo de la historia, el ser humano ha sentido la necesidad de familiarizarse con su entorno, de conocer el lugar donde habita y se desplaza diariamente. Por esta razón, ha buscado representar visualmente su conocimiento del espacio a través de los mapas. En Chile existen miles de cartografías con información valiosa, como cartas geológicas, topográficas y de peligros geológicos, entre otras. Sin embargo, la mayoría de ellos están en desuso o son desconocidos para los habitantes del país. La población, en general, no tiene experiencia en la lectura e interpretación de estos, ya que suelen ser visualmente poco atractivos y difíciles de comprender, especialmente en el caso de los mapas geológicos. En este contexto, se evidencia una falta de recursos cartográficos atractivos, comprensibles y que puedan ser utilizados fácilmente por cualquier usuario de cartografía, como pueden ser estudiantes, turistas o guías turísticos.

Los Sistemas de Información geográfica (SIG) son herramientas poderosas que se pueden utilizar para crear mapas, analizar datos y resolver problemas. Sin embargo, los SIG junto a técnicas de renderizado 3D, también se pueden utilizar para crear arte y contar historias. Estos softwares permiten agregar elementos a los mapas que otorgan características de realismo mágico, como nubes, erupciones volcánicas o cambiar las texturas para transformarlos por ejemplo en legos o bordados, con esto, se busca revitalizar, dar nuevo uso y significado, especialmente a los mapas geocientíficos, de una manera emocionante y novedosa. Estas reconstrucciones fotorrealistas en 3D aumentan el atractivo visual de las cartografías al mismo tiempo que mejora la comprensión de la historia geológica y los procesos terrestres que estos intentan transmitir. Al agregar una tercera dimensión a los mapas, la información se vuelve más intuitiva y las personas pueden relacionarse con los rasgos topográficos del paisaje, como valles, lagos y cordilleras, mejorando la comprensión de los procesos geológicos que dan forma al paisaje. Esto permite que las personas se conecten con su entorno y mejoren su capacidad de orientación, explorando el mundo de una manera novedosa y comunicando información compleja de forma fácil de entender.

El objetivo de este proyecto es hacer que las geociencias en específico los mapas, sean amigables, accesibles, divertidos y coleccionables, convirtiéndolas en productos que generen interés en la población en general de una forma que los mapas tradicionales no pueden lograr, al mismo tiempo se busca aumentar la conciencia en las comunidades potencialmente afectadas sobre los riesgos y peligros geológicos con los que conviven. Además, este proyecto permite dar vida de manera educativa y visualmente sorprendente a mapas antiguos, haciéndolos más accesibles e interesantes para los habitantes del país lo que les permite educarse de forma interactiva y novedosa sobre los beneficios y consecuencias de los procesos de la tierra. El objetivo final es que las ciencias de la tierra se integren en los hogares como elementos comunes, para concienciar sobre la importancia de conocer la tierra y sus fenómenos.

Palabras Clave: SIG, Educación, Arte, 3D, Innovación.

Aprendizaje de una muestra sobre geología local de Isla Navarino en los habitantes de Puerto Williams y su valoración por el paisaje geológico

Carolina Monsalve¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

Este estudio busca indagar cómo afecta una exposición educativa sobre los procesos geológicos y la geología local en el conocimiento de geología básico y la apreciación del paisaje geológico en la comunidad de Puerto Williams, especialmente considerando su ubicación remota y sus características geológicas distintivas en comparación con el territorio continental de Chile. Tomando en cuenta la definición y áreas que aborda la Geología, además de su relación con la formación del paisaje y territorio, esta disciplina permite el desarrollo del pensamiento crítico y analítico de procesos que se evidencian diariamente, por medio de la experimentación y la observación del entorno.

Uno de los objetivos del Currículum Nacional de Ciencias Naturales, es desarrollar la curiosidad y el pensamiento científico, siendo uno de sus ejes temáticos la evolución de la Tierra y el Universo y cómo esta presenta las condiciones necesarias para la vida. En general, busca impulsar la exploración, el trabajo en equipo y el cuidado del medio ambiente, a través de la indagación, la investigación y búsqueda de soluciones para problemáticas cotidianas.

Con esto en consideración, es posible pensar que la geología se vea representada en los Objetivos de Aprendizaje (OA) del currículum nacional, en particular en los asociados a las ciencias naturales, ya que su estudio permite aplicar actividades y temáticas que fomenten el interés científico abordando contenidos orientados a la evolución de la Tierra y el Universo, mediante la observación y experimentación con el entorno. En el currículum actual, la geología se encuentra bastante fragmentada dentro de los objetivos de aprendizaje, tanto de Ciencias Naturales como de Historia, Geografía y Ciencias Sociales. El enfoque territorial de la geología se relaciona principalmente con los recursos y fenómenos naturales de Chile, como la minería, erupciones y terremotos. En el caso particular de Puerto Williams e Isla Navarino, estos eventos no son comunes, ya que se encuentran en un contexto geológico diferente, por lo que estos contenidos del currículum no son directamente vinculables a las experiencias personales de los y las habitantes de la isla.

Por esta razón, se plantea la necesidad de evaluar el impacto de una exposición sobre la geología y la evolución del paisaje geológico de Isla Navarino para las y los habitantes de Puerto Williams. Esta se lleva a cabo en el Museo Martín Gusinde y consta de una exposición y visitas guiadas. Esta, fue diseñada considerando los currículos nacionales de Ciencias Naturales, Historia, Geografía y Ciencias y los planes diferenciados Científico-Humanista. También, se considera la geología actualizada de Isla Navarino por diversos autores e instituciones, además de bases de datos de modelación geológica.

La muestra consiste en cuatro secciones en las que se presenta la geología de isla Navarino, con una duración estimada de 1 hora. La primera sección muestra la estructura interna de la Tierra, las placas y márgenes tectónicos y los paleoambientes de Isla Navarino y sus alrededores, considerando las últimas reconstrucciones paleogeográficas. La segunda sección corresponde a una exposición sobre las rocas, su definición y los tipos que existen, además de un muestrario de rocas de la isla. La tercera sección desarrolla los conceptos de evolución del paisaje, considerando las estructuras geológicas y la erosión glacial de la superficie. La última sección corresponde al cierre y contempla la apreciación y valorización del territorio con un mapa de la isla, el cual será intervenido por las y los visitantes, relacionando lo aprendido con lugares y paisajes geológicos importantes para ellos/as en la isla.

Estas visitas guiadas consideran preguntas de investigación para analizar el efecto que tiene esta muestra en las y los habitantes de Puerto Williams y su relación con el paisaje geológico, las cuales serán analizadas con el fin de tener una mejor comprensión sobre el impacto de esta exposición en la valorización del territorio.

Palabras Clave: Divulgación geociencias, Paisaje Geológico, Puerto Williams, Antártica, Isla Navarino.

Financiamiento: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Instituto Antártico Chileno (INACH) RT-44-18, titulado "Paleogeografía del Grupo Heritage inferior, Montañas Ellsworth", en colaboración con el proyecto de instalación "Evolución tectónica y paleogeográfica de Isla Navarino" de la Universidad de Chile y el plan nacional de geología "IR Geología Básica y Aplicada de la parte Occidental de Isla Navarino" del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Además, cuenta con el apoyo del Museo Antropológico Martín Gusinde de Puerto Williams.

Puesta en valor del patrimonio paleontológico – geológico de Quebrada Descubridora, Región de Atacama, Chile

Badith Muñoz Franco¹, Maccarena Naveas Díaz¹, Luciano Travella Barrios¹, Sebastián González Guerra¹, Gyslaine Mansilla Escobar¹, Felipe Véliz Rivas¹, Miguel Cáceres Munizaga¹, Manuel Abad De Los Santos²

(1) Geoturismo Lickanantay Limitada, Monte Amargo #880, Copiapó, Chile

(2) Universidad Rey Juan Carlos, Dpto. Biología y Geología, Calle Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Spain)

La región de Atacama se sitúa en la zona austral del desierto no polar más árido del mundo, condición climática que propició la preservación de una gran geodiversidad y belleza escénica. En este sentido, se reconocen diversos contextos geológicos que facilitan la comprensión de la evolución de su paisaje desde el Paleozoico tardío hasta el presente (Cáceres et al., 2011). Dentro de esta variedad, existen atractivos incipientes que podrían significar un enriquecimiento de la identidad territorial y sus actividades económicas, como es el caso de Quebrada Descubridora, geosítio situado a unos 20 km al SE de Tierra Amarilla, región de Atacama. El lugar se caracteriza por un conjunto de rocas cretácicas, agrupadas en la Formación Pabellón de edad Barremiano-Aptiano (Biese-Nickel, 1942), que preservan y relatan el gradual paso de condiciones marinas a continentales a través de restos de *thalassinoides*, ondulitas, bivalvos e incluso icnitas de dinosaurios tipo terópodos y ornitópodos, siendo estas últimas el primer registro de huellas de herbívoros de la región (Rubilar-Rogers et al., 2014).

En el marco del proyecto “Puesta en Valor del Patrimonio Paleontológico – Geológico de Quebrada Descubridora” desarrollado por Geoturismo Lickanantay, empresa fundada por estudiantes de geología que incentivan la educación en Ciencias de la Tierra, se crearon herramientas de divulgación durante los años 2021 y 2022. Las actividades incluyeron el levantamiento de información geológica sobre la geodiversidad y patrimonio geológico de la zona para establecer un sendero temático con énfasis en la comprensión del paleoambiente, el cual se complementó con fotografías, ilustraciones inéditas y tres piezas audiovisuales. Además, las labores incluyeron destinos cercanos a Quebrada Descubridora que otorgan valores naturales y culturales al proyecto.

De acuerdo con la información existente y los antecedentes obtenidos en terreno, se elaboró un inventario de sitios de interés de la comuna de Tierra Amarilla con el fin de reconocer sus características, condiciones y valores educativos - turísticos. Se utilizaron y ajustaron las metodologías propuestas por Lima et al. (2010) y Brilha (2016) acorde con parámetros relacionados al contexto local, evaluando elementos de geodiversidad, biodiversidad o culturales por medio de fichas de cuantificación. Se seleccionaron seis sitios: Museo Minero, Lomas Bayas, Mina El Tránsito, la casa de Jotabeche, Viña del Cerro y el embalse Lautaro, los cuales registraron casi en su totalidad limitantes asociadas a las condiciones de acceso y lejanía respecto a otras áreas recreacionales o turísticas. No obstante, estos lugares presentan elementos de gran valor geológico, cultural y patrimonial minero, e incluso varios están bajo el alero de alguna figura de protección legal.

Los principales resultados del proyecto son: i) guía geoturística de Quebrada Descubridora y atractivos cercanos; el libro incluye ilustraciones, fotografías y códigos QR con videos educativos complementarios, ii) sendero con señalizaciones informativas en Quebrada Descubridora, iii) página web para agendar visitas, descargar la guía y acceder a información sobre geología - paleontología, y finalmente iv) una charla sobre el proyecto a estudiantes de geología de la Universidad de Atacama (UDA). La idea llevada a cabo con el departamento de geología de la UDA espera ampliar la posibilidad de estudios en el lugar y crear nexos con entidades científicas.

A la fecha, Quebrada Descubridora es el tercer geosítio, junto con la Tonalita Orbicular y Zoológico de Piedra, con un plan concreto de puesta en valor y el único con un sendero habilitado e inclusivo de la región (traslado para silla de ruedas). Es trascendental abordar aquellos mecanismos administrativos y legales que pueden aportar a la conservación del patrimonio geológico, como ocurrió en este caso a través de un plan de puesta en valor incluido en la Resolución de Calificación Ambiental del proyecto de COEMIN. En este sentido, los inventarios de geodiversidad deben reconocer las actividades y usos humanos, para así dirigir las acciones hacia las comunidades, autoridades y empresas dispuestas u obligadas a implementar proyectos de geoconservación.

Palabras Clave: Geoturismo, Icnitas, Dinosaurios, Geosítio, Atacama.

Financiamiento: Se agradece al Grupo Minero Carola-Coemin y a la gerencia de Medio Ambiente, Permisos y Comunidades por el financiamiento del proyecto.

Fundación Sketch of Geology: Pioneros en la Divulgación Geocientífica Ilustrada en Chile

Sofía Pino Mora¹, Marco Valle Flores², Pablo Salinas Velásquez², Nicolás Espinoza Tapia²

(1) Universidad Católica de Temuco, Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Rudecindo Ortega 2950, Temuco, Chile

(2) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Av. Rector Eduardo Morales Miranda 23, Valdivia, Chile

Sketch of Geology es una fundación sin fines de lucro integrada por estudiantes de Geología de la Universidad Católica de Temuco y de la Universidad Austral de Chile. La fundación se constituye con el objetivo de contribuir a la alfabetización y democratización de los conocimientos y saberes fundamentales de las Ciencias de la Tierra, apuntando tanto a la comunidad geocientífica, como a un público no especializado (o “público general”). Para el logro de dicho objetivo, Sketch of Geology utiliza y confecciona productos digitales y audiovisuales tales como ilustraciones geológicas, afiches informativos, documentales y entrevistas a profesionales de las geociencias.

El inicio del trabajo de Sketch of Geology se remonta a marzo de 2019, a partir del diagnóstico de un grupo de estudiantes de la Universidad Católica de Temuco sobre la falta de innovación en técnicas o métodos didácticos de enseñanza que complementasen el aprendizaje y entendimiento de las Ciencias de la Tierra. Esta necesidad pedagógica identificada por los estudiantes vino a impulsar la difusión -y posterior divulgación- de la geología entre sus pares geocientistas, por medio de la confección de ilustraciones digitales, siendo el arte el principal recurso pedagógico.

De esta manera, Sketch of Geology comienza a trabajar en diversas plataformas comunicacionales (Instagram, Youtube y Facebook) a través de las cuales difunde material digital en la forma de ilustraciones conceptuales y artísticas, charlas, videos informativos y entrevistas, las cuales proporcionan información sobre experiencias, definiciones y procesos asociados a la geología del territorio nacional. Un temprano hito del trabajo de Sketch of Geology fue el ciclo de entrevistas titulado “El quehacer de los profesionales en las ramas de las Geociencias”, el cual se realizó durante mayo y julio de 2020, y cuyo objetivo fue educar a la población sobre el rol profesional que ejercen destacados geocientíficos/as en múltiples áreas.

A principios de 2021 se incorporan nuevos estudiantes al equipo de trabajo, pertenecientes a la Universidad Austral de Chile y Universidad Católica del Norte, tras lo cual se conforma una nueva directiva y se definen los estatutos legales de la fundación, constituyéndose oficialmente como persona jurídica sin fines de lucro el 10 de junio de 2021, en dependencias de la Ilustre Municipalidad de Valdivia. Así, Sketch of Geology consolida su compromiso con la divulgación y difusión de las geociencias en el territorio.

Desde entonces, la Fundación ha seguido elaborando nuevas e innovadoras ilustraciones y videos con contenido geológico, enfatizando el involucramiento en iniciativas de carácter social y ambiental que permitan estrechar su vínculo con la comunidad.

En el mediano plazo, la Fundación Sketch of Geology pretende concretar una serie de proyectos con el fin de continuar profundizando en la divulgación de las Geociencias, y de este modo, generar una mayor conciencia ambiental, valoración del patrimonio geológico y comprensión espacial del entorno en la sociedad, aportando a la reducción de brechas de conocimiento y a la alfabetización geológica, la cual resulta especialmente relevante dada la diversa geografía de nuestro país.

Palabras Clave: Divulgación, Difusión, Ilustración Geocientífica, Material Audiovisual, Geoeducación.

Uso de material interactivo para el aprendizaje sobre remociones en masa a estudiantes de educación básica. Caso de estudio: Chiguayante, región del Bío Bío

Natalia Sofía Sepúlveda Díaz¹, Carla Sepúlveda Díaz², Alejandra Serey Amador³

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina Regional Sur, Región del Biobío, San Martín 1295, Concepción, Chile

(2) Universidad Católica de la Santísima Concepción, Instituto tecnológico, Ingeniería, Caupolicán 276, Los Ángeles, Chile

(3) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería, Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

Chile es el laboratorio perfecto para el estudio de los peligros geológicos: Terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis, aluviones, deslizamientos, entre otros. Además, existe una compleja interrelación en cascada entre ellos y otros factores externos, como el cambio climático global. Estos conceptos son desafiantes de difundir en las comunidades y adicionalmente en nuestro país está muy poco divulgado el llamado "Ciclo del Riesgo", el cual establece etapas antes, durante y después de los riesgos socio-naturales. Adicionalmente la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías están siendo incorporadas en el sistema educativo con el fin de apoyar el aprendizaje, aumentar la motivación y adaptación de los(as) estudiantes. Por ejemplo el uso de herramientas tecnológicas como Makey Makey y Programación en bloques son unas de esas ayudas que se pueden integrar con éxito para mejorar la enseñanza.

Uno de los peligros geológicos más recurrentes y que ha aumentado su frecuencia debido al cambio climático son las remociones en masa. Una de las comunas afectadas por estos eventos es Chiguayante, la cual es parte del área Metropolitana del Gran Concepción (AMC). Se ubica en el contacto entre un cordón montañoso granítico siendo su cumbre más extensa el Cerro Manquimávida y una terraza fluvial. La ocurrencia de remociones en masa en el área está documentada por Sernageomin desde el año 1999. Estos eventos han sido repetidos en el tiempo, siendo los más catastróficos, los flujos y deslizamientos ocurridos durante junio 2005 y julio 2006, dejando 11 fallecidos. Este estudio presenta un reporte de experiencia en donde se presenta el cómo mediante una maqueta 3D de la zona de Chiguayante conectada a un dispositivo como Makey Makey y programada con la herramienta Scratch proporciona una nueva forma de enseñar conceptos a estudiantes de educación básica sobre la generación de las remociones en masa.

La maqueta es de plumavit de alta densidad fabricada por la máquina fácil cnc de 45 x 80 cm realizada por la empresa de Maquetas topográficas Geo.imagen. Se pintó con acrílicos Artel y pinceles para entender críticamente el entorno, realizando una integración con los informes levantados por sernageomin, pintando de colores diferentes las quebradas que se encuentran activas y las que tienen antecedentes de movimientos recientes. Para resaltar los temas más relevantes se utilizaron conexiones electrónicas, táctiles, grabación de voz por Makey-Makey y programación por bloques (scratch), como por ejemplo elementos morfológicos que están relacionados en la generación de una remoción en masa (laderra, estero, rodado, quebrada, deslizamiento, montaña). Además de esto, se puntualiza en la maqueta las zonas de primera necesidad en una comuna, tales como los colegios, jardines infantiles, hospitales, entre otros, con el fin de poder mostrar la interacción recurrente entre peligros asociados a remociones en masa y su entorno diario.

Palabras Clave: Ferias de gestión del riesgo, Makey Makey, programación en bloque, Chiguayante, estudiantes.

Impacto de las RRSS en la divulgación de las geociencias: Caso de estudio - terremotos

Alejandra Serey Amador¹, Catalina Morales-Yañez²⁻³, María Constanza Flores⁴, Héctor Orellana⁵

(1) Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Libertador Bernardo O'Higgins 611, Rancagua, Chile

(2) Universidad de la Santísima Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Av. Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile

(3) Fundación Geonautas

(4) Centro sismológico Nacional, Beauchef 850, Santiago, Chile

(5) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

Chile es el laboratorio perfecto para el estudio de peligros geológicos: Terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis, trombas, aluviones, deslizamientos, etc. Además, tenemos los peligros geológicos en cascada, es decir que un peligro geológico desencadena otros peligros geológicos, estilo dominó. Por ejemplo, el terremoto de 1960 (Mw 9,5) generó tsunamis y grandes deslizamientos, el más destacado el llamado Riñihual, el cual embalsó el río San Pedro. Por otro lado, las redes sociales (RRSS) son parte activa y de gran importancia en la vida cotidiana de la población. Nos informamos e interactuamos con más de 2 plataformas día a día como lo son Instagram, Twitter, Facebook, tiktok, etc. Y es muy probable que nos informemos de los desastres a través de las RRSS. Además, la mayoría de las instituciones educacionales y organismos públicos cuentan con estas vías de difusión y son parte de su quehacer en la intervención con el medio. Es entonces que surge la necesidad de transmitir la información académica y divulgar los descubrimientos científicos a la población en los diferentes tópicos de la geociencia. Lamentablemente, desde la academia hay un escepticismo por el uso de las RRSS como medio de divulgación y no se ve su gran potencial. Sin embargo, existe un importante aumento de los geodivulgadores en los medios de comunicación como televisión y radio debido a los últimos peligros geológicos acontecidos (terremotos, erupciones, aluviones, trombas, etc.) y a las inminentes consecuencias asociadas al cambio climático. El presente trabajo busca determinar el real impacto de las RRSS en la divulgación de las geociencias, tomando como caso de estudio el tópico de los terremotos. Buscamos cuantificar el real impacto de las redes sociales en un tópico que es de gran interés para la población y a la vez, de bajo o nulo conocimiento. Para esto se utilizan infografías de tierra sólida, tipos de terremotos y sus orígenes, sumado a encuestas online cuantitativas y cualitativas, buscando determinar si existe comunicación efectiva a través de las redes sociales. Las publicaciones y encuestas son una colaboración entre los siguientes geodivulgadores: Srta Replica, Fundación Geonautas, Geociencia Chile y La profe de aplicada. Creemos fehacientemente que las y los geodivulgadores llegaron para quedarse y son de gran impacto para un gran número de estudiantes, profesionales, colegas, vecinos(as) y comunidades.

Palabras Clave: Redes sociales, Geodivulgadores, terremotos.

Agradecimientos: Se agradece el apoyo de ANID/FONDECYT 3230676CMY y de ANID/FONDECYT 3220307

Primer Voluntariado Científico en Rapa Nui: La importancia de la comunicación entre la comunidad y la labor científica

Matías Silva Arce¹, Carolina Gómez Fontalba¹, Gabriela Barraza Cartagena¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

La isla volcánica de Rapa Nui, ubicada a aproximadamente 3000 km de las costas chilenas, presenta un contexto geológico único en nuestro país, esto es, su origen volcánico junto con procesos erosivos que modelan su paisaje debido a condiciones climáticas particulares de la isla. Por esto, se puede decir que configuran una historia paleoclimática y paleohidrológica única, de las cuales no existen otros registros en todo este sector del Pacífico Sur.

Sin embargo, su potencial geológico no ha sido indagado en su totalidad. Por esta razón, a causa de curiosidad por este potencial fue que, en un inicio, Carolina Gómez quien pasaría a ser la coordinadora de este voluntariado se vio interesada en coordinar labores en la isla. Sin embargo, debido a un catastrófico incendio ocurrido el 4 de octubre del 2022, la necesidad de ayuda se volvió imperante y esto llevó a Carolina a realizar un llamado abierto, que motivó a un grupo de alumnos voluntarios dispuestos a ayudar y realizar estudios en esta particular isla.

De esta forma, nació el voluntariado con dos objetivos claros. Por un lado, una labor científica, centrada en las necesidades del pueblo Rapa Nui, realizando una evaluación de las condiciones del humedal tras el catastrófico incendio, de acuerdo a lo solicitado por las autoridades de la comunidad indígena Ma'u Henua. Por otro lado, el segundo objetivo se centró en la vinculación con los habitantes de la isla a través de la divulgación y difusión científica, eje fundamental del voluntariado.

Este segundo objetivo, consistió y se llevó a cabo a través de diversas actividades enfocadas en diversos sectores de la comunidad, entre ellos: guías turísticos de la Asociación de Guías, guardaparques de CONAF, autoridades de CODEIPA y Ma'u Henua, miembros de la comunidad científica de la isla, niños y niñas, jóvenes y pueblo Rapa Nui en general.

El acercamiento a la comunidad comenzó a través de charlas y talleres de presentación. Esto fue la puerta de entrada a un diálogo constante entre los y las voluntarias con la comunidad, lo cual sirvió de canal de retroalimentación hacia la labor científica realizada, ya que permitió recabar información, como registros orales de eventos climáticos y eventos de inestabilidad de laderas en el pasado reciente. Esta información permitió complementar la base de datos y utilizarla como referencia.

Bajo el alero de este mismo canal de comunicación se realizaron actividades como talleres, exposiciones de pósters e incluso entrevistas de radio y televisión para hablar de geología, área científica menos divulgada y conocida que, por ejemplo, la arqueología y la antropología.

Las actividades realizadas permitieron el desarrollo de conversaciones que ilustraron diversos aspectos de la labor científica. Además, fueron de un valor cultural y humano invaluable para las y los voluntarios, ya que les permitió conocer la cosmovisión de la comunidad Rapa Nui. Lo anterior se generó de manera simultánea con el desarrollo de actividades técnicas, como talleres sobre los tipos de rocas observados en la isla, volcanología y diversas disciplinas geológicas de interés para la comunidad.

Estas conversaciones permitieron una constante retroalimentación entre el conocimiento científico-técnico y lo observado desde tiempos ancestrales, lo que propició una mayor comprensión de lo observado por parte de los voluntarios. También, generó una comprensión técnica del origen de los fenómenos que la comunidad observa día a día, lo que generó una relación sinérgica y complementaria entre la comunidad y los miembros del voluntariado.

En conclusión, a partir de lo experimentado durante el Primer Voluntariado Científico en Rapa Nui, es notoria la necesidad de vincularse con la comunidad. Esta relación puede ofrecer una invaluable fuente de información local que muchas veces no se encuentra completa o correctamente documentada, además de motivar a las generaciones más jóvenes a interesarse por la ciencia. Asimismo, la vinculación que se desarrolló entre los y las voluntarias y la comunidad, favoreció una mejor organización territorial, la cual ayudó a dirigir las labores científicas

Palabras Clave: Rapa Nui, Divulgación Científica, Comunidad, Geociencias en Terreno.

Financiamiento: Financiado por CONAF Rapa Nui y Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas Matemáticas, Universidad de Chile.

Agradecimientos: A las coordinadoras, Carolina Gómez y Gabriela Barraza, Profesoras Dra. Valentina Flores y Laura Beceril, CONAF Rapa Nui y Ma'u Henua por el apoyo. En especial a cada uno de los voluntarios.

Percepción y Divulgación de la Geología en Chile

Pas Victoria Toledo Rubilar¹⁻²

(1) Instituto para la Resiliencia ante Desastres, La Concepción 191, oficina 601, Providencia, Chile
(2) Sociedad Geológica de Chile, Grupo de Educación, Valentín Letelier 20, Of 401, Santiago, Chile

INTRODUCCIÓN

Chile es uno de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) más expuesto a desastres naturales, con un 54% de la población afectada y el 12,9% de su superficie expuesta a tres o más amenazas como terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis, inundaciones, sequías, incendios forestales, deslizamientos y marejadas (Comisión de I+D+i para la Resiliencia Frente a Desastres de Origen Natural (CREDEN), 2016). Frente a esta situación, existe mayor demanda social de vinculación de parte de la población con las disciplinas de las Ciencias de la Tierra, para comprender los fenómenos naturales que afectan su entorno, siendo la Geología la Geociencia que genera mayor interés y participación por parte de la población en su seguimiento y análisis (Jensen, 2010).

Las Ciencias de la Tierra son particularmente significativas para la formación de ciudadanos que deben contar con las competencias necesarias para promover el desarrollo sostenible (Macedo, 2019). Una persona alfabetizada en geociencias debería conocer cómo funciona la Tierra, disponer de la perspectiva temporal sobre los cambios que han afectado nuestro planeta, entender las interacciones entre humanidad y planeta, ser capaz de buscar y seleccionar información sobre procesos que afectan la Tierra y saber utilizar los principios geológicos básicos (Pedrinaci et al., 2015).

La divulgación científica, conocida como educación no formal, se define como el conjunto de actividades que interpretan y hacen accesible el conocimiento científico al público general (Sánchez et al., 2011). La difusión científica se define como la propagación del conocimiento entre especialistas conteniendo elementos propios de un discurso especializado y una estructura que se constituye en factores claves a la hora de su evaluación (Espinoza, 2010). Ambas son actividades de comunicación, pero se diferencian en el lenguaje utilizado y el público objetivo. Se hace necesario realizar esta aclaración, para que no se interpreten estos términos como sinónimos.

En divulgación científica existen dos modelos comunicativos:

MODELO DE DÉFICIT: El público carece de información científica y los esfuerzos de la comunicación se centran en disminuir esa desinformación a través de métodos masivos de comunicación, disminuyendo con ello la desalfabetización científica en la población. Se privilegia a los científicos y hace hincapié en la comunicación en un solo sentido, de los expertos al público (Lozano, 2008).

MODELO DEMOCRÁTICO: Discute sobre la participación de grupos sociales, políticos, científicos, expertos y empresarios en la definición de políticas públicas y toma de decisiones científicas (Lozano, 2008). Busca establecer una relación de igualdad entre científicos y público, enfatizando el diálogo entre expertos y personas que carecen de experiencia en determinados temas (Arias, 2011).

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el país no existe un catastro ciudadano de la alfabetización de las Ciencias de la Tierra, ni de los profesionales que hacen o han realizado divulgación científica geológica por motivación personal, académica, laboral o por medio de la adjudicación de proyectos de investigación financiados por el Estado de Chile, como el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT). Debido a esta falencia, este trabajo investiga la percepción y conocimientos que tiene la sociedad chilena sobre la Geología, y la participación en actividades de divulgación geológica de estudiantes, profesionales, docentes e investigadores del país.

METODOLOGÍA

Elaboración de dos encuestas a través de Google Forms. Aplicación online de ambas con objetivos y públicos específicos, que se detallan a continuación:

Encuesta 1 "Percepción de la Geología en Chile"

Aplicada a todo público (población general y comunidad geológica) con el objetivo de conocer la percepción y conocimientos de la Geología en la población chilena y censar el número de profesionales de las geociencias que hacen o han realizado divulgación en los últimos 5 años en el país. La encuesta fue difundida durante los meses de enero y febrero de 2021 por medio de redes sociales y equipos de profesionales ligados a las geociencias. Para su análisis, los datos fueron divididos en dos grupos de estudio:

Grupo 1: Población General: Compuesto por profesionales no vinculados a la Geología, desempleados, jubilados, estudiantes de educación media, superior y de postgrado, y dueñas de casa. Se hicieron diez preguntas de selección múltiple, donde debían escoger una o varias opciones.

Grupo 2: Comunidad Geológica: Formado por profesionales y estudiantes de las carreras de Geología de distintas universidades del país. Se realizaron seis preguntas, tanto de selección múltiple como abiertas.

Encuesta 2 “De qué manera divulgan las geociencias los investigadores y docentes en Chile”

Aplicada a profesionales de las Ciencias de la Tierra con Proyectos FONDECYT de Iniciación o Regular entre los años 2015-2020, con el objetivo de conocer cuántos investigadores divulgan sus proyectos y cómo enfocan dicha divulgación. A este grupo se les aplicó trece preguntas de selección múltiple, donde debían seleccionar una o varias opciones. La encuesta fue enviada a los correos electrónicos de los docentes e investigadores entre mayo y junio de 2021. Se seleccionaron los proyectos FONDECYT de ANID por ser la principal línea de financiamiento del país para la investigación científica y tecnológica, además, existe una base de comparación (Póster presentado en el XIV Congreso Geológico de Chile), donde se analizan los proyectos FONDECYT Regular entre los años 2012-2014, lo que permite establecer comparaciones entre ambos periodos.



Niños observando un volcán en el lanzamiento de un proyecto de divulgación dirigido a público preescolar en la ciudad de Curicó, Región del Maule

DISCUSIÓN

Encuesta 1: Percepción y alfabetización de la Geología en Chile

La discusión de la Encuesta 1 se centra en los aspectos relevantes de los resultados de la percepción y alfabetización de las geociencias en la sociedad y la participación de la comunidad geológica en iniciativas de divulgación. Es importante remarcar que no existen otras investigaciones en Chile con las cuales se pueden contrastar estos datos, siendo esta investigación la primera. La encuesta fue respondida por 289 personas, de las cuales, 148 corresponden al grupo 1 (población general) y 141 al grupo 2 (comunidad geológica).

Al revisar la encuesta enfocada a público general se observa que:

El 80% de las personas tienen una idea clara de qué es la geología y un 86% puede reconocer una definición básica de ella.

Un 93% piensa que la población tiene pobres conocimientos geológicos sobre una ciencia que está directamente relacionada con eventos naturales extremos.

El escenario es similar cuando se les pregunta la apreciación personal que tienen sobre sus conocimientos geocientíficos:

Un 52% declara tener pocos conocimientos.

Un 5% declara tener muchos conocimientos y son profesionales afines a la geología.

Al intentar explicar la causa de la escasa cultura geocientífica de la población:

El 43% coincide que es responsabilidad del Estado enseñar a la ciudadanía contenidos geológicos en las bases curriculares de enseñanza básica y media, sin embargo, los contenidos relacionados a las ciencias de la Tierra en base a los Objetivos de Aprendizaje (OA) de todas las asignaturas de 1° básico a 4° medio es de aproximadamente un 5% (56 OA de un total de 1.271).

Un 35% coincide que temáticas relacionadas a los fenómenos naturales, como terremotos, tsunamis o erupciones volcánicas son conceptos que debe aprender la población, mientras que la minería sigue siendo un tema que no llama la atención de aprender aun cuando es primordial en relación a la economía del país. Al analizar los OA del currículum nacional, los estudiantes solo tienen cuatro instancias donde deben investigar, describir, ubicar y proponer medidas de prevención y seguridad ante los fenómenos naturales extremos que pueden afectar su entorno, siendo una cantidad insuficiente tomando en cuenta la ubicación geográfica y las características geológicas que posee Chile.

Un 97% espera que la comunidad geológica se acerque a ellos utilizando un modelo comunicacional democrático.

Con relación a la participación de la comunidad geológica en los últimos 5 años:

Un 57% ha colaborado en actividades de divulgación. De ellos, el 36% está vinculado a una casa de estudios de educación superior y solo un 1% a junta de vecinos. El gran número de profesionales vinculados a casas de estudios de educación superior está directamente relacionado con la nueva ley de Educación Superior Ley N° 20.129, donde las instituciones deben contar con políticas y mecanismos sistemáticos de vinculación bidireccional con su entorno significativo local, nacional e internacional, y con otras instituciones de educación superior, que aseguren resultados de calidad, a través de Vinculación con el Medio, requisito para la acreditación institucional a partir del año 2020.

Sobre las maneras que divulgan las geociencias los investigadores, los encuestados se inclinan por proyectos en sitios web y en redes sociales, siguiendo un modelo comunicacional afín al de déficit. Finalmente, el total de ciudades donde se han realizado actividades de divulgación sumaron 17, abarcando tres macrozonas de Chile: norte, centro y sur.

Encuesta 2: De qué manera divulgan las Geociencias los investigadores y docentes en Chile

De una base de datos de 120 investigadores que se adjudicaron proyectos FONDECYT de Iniciación y Regular entre el 2015-2020, solo 43 profesionales respondieron la encuesta (34%). De este grupo:

Un 77% considera que la divulgación es parte de la ética de un profesional, pero un 70% nunca ha participado en la toma de decisiones en políticas públicas a nivel país.

Un 74% contempla dentro de sus proyectos actividades de divulgación geológica.

Un 53% manifiesta que la divulgación de su proyecto es muy importante.

Las motivaciones para divulgar, sus preferencias se relacionan con la contribución en el ámbito social como educacional, sin embargo, sus limitaciones se centran en la poca compatibilidad entre las actividades de docencia e investigación.

El público objetivo a los cuales se enfoca la divulgación geocientífica es más bien general (sin especificar un nicho) y a estudiantes de educación básica, media y superior, no considerando a los adultos de la tercera edad y a las personas en situación de discapacidad (existen pocos registros de divulgación geológica inclusiva, en comparación con otras ciencias, como la astronomía).

El modelo comunicativo que más utilizan los investigadores es el de déficit (69%), con charlas, artículos en prensa, entrevistas. El 26% que no contemplan actividades de divulgación geológica comentan que sus proyectos son poco interesantes o que sus investigaciones son complejas de entender, sin embargo, un 55% de los que no divulgan consideran muy importante la divulgación.

Otero y Fariña (2015) investigaron 49 proyectos FONDECYT Regulares adjudicados entre los años 2012-2014, para conocer cómo y hacia qué público divulgaban las geociencias los principales investigadores del país. Las propuestas de divulgación que más se repitieron con un 60% fueron las charlas, entrevistas en medios de comunicación y talleres. En cuanto al público objetivo, las preferencias fueron el público general y los estudiantes con un 55%.

Comparando los resultados de este trabajo con los de Otero y Fariña (2015) se observa que:

Existe un interés de parte de los investigadores en divulgar sus proyectos, así como también, una similitud en el tipo de divulgación y los públicos objetivos.

Los investigadores no salen de su zona de confort en cuanto al modelo comunicacional (Déficit), no explorando o entregando sus conocimientos y resultados a públicos con distintas necesidades, como lo son los adultos mayores y las personas en situación de discapacidad.

La información sigue siendo enfocada de la misma manera y llegando a los mismos públicos.

La divulgación del conocimiento científico es una responsabilidad de todo aquel que investiga, porque contribuye a la democratización del conocimiento.

Saber divulgar una investigación científica es una forma de gestión del conocimiento adquirido, hoy cada vez más importante en el mundo académico.

CONCLUSIONES

A nivel individual los encuestados saben que es la geología, de qué trata y su significado, pero consideran que a nivel grupal la sociedad no posee los suficientes conocimientos.

La enseñanza y posterior conocimiento de la geología depende principalmente de la educación formal a través de los objetivos de aprendizajes con contenidos sobre ciencias de la Tierra en las bases curriculares del plan nacional de estudios de educación preescolar, básica y media, hoy insuficientes para las características geológicas y vulnerabilidad que presenta el país tanto para los fenómenos naturales como por el cambio climático.

Las formas de encontrar o recibir información geológica del público general es por medio de videos, infografías a través de las diferentes plataformas de redes sociales y programas de TV.

El modelo comunicacional que espera la sociedad de parte de los investigadores es el modelo democrático. Sin embargo, el modelo comunicativo más utilizado por la comunidad geológica en la divulgación es el modelo de déficit realizado principalmente a través de actividades convocadas por las universidades y grupos de profesionales con interés afines a la divulgación. La principal audiencia de los investigadores es el público general y utilizan el modelo de déficit a través de un lenguaje sencillo.

Un tercio de los investigadores adjudicados con proyecto FONDECYT respondieron la encuesta, de ellos la mayoría está de acuerdo que divulgar sus proyectos es parte de ética profesional, sin embargo, sólo un tercio de los investigadores ha participado en la toma de decisiones en políticas públicas a través de sus investigaciones. Más de la mitad de los investigadores han realizado divulgación de sus proyectos FONDECYT, y consideran que divulgar es muy importante debido a que contribuyen a la sociedad, sin embargo, a la hora de hacerlo encuentran limitaciones debido a sus actividades de docencia e investigación. Por otro lado, quienes no divulgan consideran que sus proyectos no son de importancia para la sociedad o bien son sobre temáticas consideradas para especialistas, lo cual le resta importancia para ser divulgados.

Palabras Clave: Divulgación, Geología, Educación, FONDECYT, PERCEPCIÓN.

Agradecimientos: A la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo por facilitar el acceso a su base de datos del Programa FONDECYT y a las personas por responder la encuesta.

Referencias:

- Arias, L. 2011. La exclusión y la comunicación de la ciencia y la tecnología en un nuevo contrato social sobre la ciencia. Revista Ciencia Tecnología Sociedad, (4): 155-167. Medellín.
- CREDEN (Comisión de Resiliencia Frente a Desastres de Origen Natural). 2016. Hacia un Chile Resiliente frente a Desastres. Una Oportunidad. Informe a la Presidenta de la República Michelle Bachelet. Inédito. 192. Santiago.
- Espinoza, V. 2010. Difusión y divulgación de la investigación científica. Revista IDESA, Vol. 28, (3): 6-7. Arica.
- Jensen, P. 2010. A Statistical picture of popularization activities and their evolutions in France. Public Understanding of Science 1-11.
- Lozano, M. 2008. El nuevo contrato social sobre la ciencia: retos para la comunicación de la ciencia en América Latina. Revista Razón y Palabra, Año 13, (65): 1-19. Quito.
- Otero, S. & Fariña, L. 2015. ¿Cómo se divulgan las ciencias geológicas hacia la sociedad en Chile? Congreso Geológico Chileno N°14, Actas 1: 446-448. La Serena.
- Pedrinaci, E.; Alcalde, S.; Alfaro, P.; Almodóvar, G.; Barrera, J.; Belmonte, A.; Brusi, D.; Calonge, A.; Cardona, V.; Crespo, A.; Feixas, J.; Fernández, E.; González, A.; Jiménez, J.; López, J.; Mata, J.; Pascual, J.; Quintanilla, L.; Rábano, I.; Rebollo, L. & Rodrigo, A. Alfabetización en Ciencias de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Vol. 21, (2): 117-129. Sevilla.
- Sánchez, Y. & Roque, Y. 2011. La divulgación científica: una herramienta eficaz en centros de investigación. Bibliotecas. Anales de Investigación, Año 7, (7): 91-94. La Habana.

Arcillas, más que un suelo: Las geociencias como herramienta de empoderamiento del arte e industria de la cerámica en la región del Biobío

Emiliano Tomás Vega Ruiz¹⁻², Aníbal Gajardo³, Camila Aguirre Concha¹, Fernanda Pérez Guzmán¹, Agustín Contreras Ananías¹, Anaís Jerez Chamorro¹, Daniela Torres Avello¹, Carolina Jara¹, Alexis Loyola Jerez¹

(1) Fundación Procultura, Carmencita 245 d., Comuna de las Condes, Santiago, Chile

(2) Universidad de Concepción, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

(3) Servicio Nacional de Geología y Minería, Santa María #0104, Providencia, Santiago, Chile

El "Turismo Creativo" es conocido como la nueva generación de turismo, ya que su principal característica radica en permitir a los visitantes descubrir y entender la cultura local, siendo partícipe de las actividades artísticas y creativas, generando experiencias más inmersivas y una relación de co-creación de experiencias. Supone la generación de experiencias turísticas, una dimensión de la economía creativa, que van más allá de la simple comercialización, que insta a combinar la tradición con la innovación, con la creatividad como hilo conductor, e impulsando su desarrollo mediante la participación y el fomento de oportunidades para las comunidades (1).

Basado en la creación y fomento de nuevas oportunidades de ingreso y empleabilidad, derivadas del reconocimiento de valores identitarios del territorio en conjunto a sus habitantes, es que se busca, para la Región del Biobío, dar mayor relevancia en el valor cultural e histórico del arte y oficio de la alfarería y cerámica, la cual resulte en una activación económica, del patrimonio y la producción local de las principales comunas que históricamente han practicado este oficio: Nacimiento, Lota, Penco y Florida, fortaleciendo su identidad.

Así, surge la necesidad de realizar un diagnóstico patrimonial de la cerámica y una reconstrucción histórica de este oficio, de manera de identificar y cuantificar todas las aristas que han sustentado la base, formado y sostenido esta tradición en la región a lo largo del tiempo hasta el día de hoy. Entre estas importantes características se pueden reconocer, por nombrar algunas, a los artesanos y sus familias, tradiciones culturales singulares a cada territorio, identidad e historia del territorio, técnicas de alfarería, archivos fotográficos y registros orales, y colecciones de piezas de alto valor cultural. Sin embargo, entre estas cualidades que hacen único a este oficio, diferenciándolos incluso entre ellos aunque pertenezcan al mismo lugar o territorio, existe una característica que es esencial, trascendental e inherente a éste, la cual engloba e impacta en todas las aristas y que ha sido incorporado en este diagnóstico patrimonial: los suelos, arcillas y gredas como materia prima y su alto valor en la región.

Los suelos han sido el sustento de este oficio desde el período Precolombino. Las arcillas son el motor y primera causa de la alfarería y, paradójicamente, de todas las características nombradas anteriormente, es la de que menos información tienen los alfareros, en cuanto a su origen y características geológicas, distribución y su relación con la geografía y paisajes de la región. Si bien aquellas personas que trabajan en el rubro conocen los distintos tipos de arcillas y pastas, como también sus características, desde un punto de vista industrial y artístico, existe un bajo conocimiento del porqué es posible encontrar en esta región yacimientos de arcillas tan diversos, pero que comparten un origen en común, hasta ahora, desconocido para ellos.

Mediante una investigación bibliográfica basada principalmente en los trabajos de Gajardo y Carrasco (2,3,4) se recopiló información geológica sobre la formación de arcillas en la región. La base de catastros de yacimientos de arcilla de SERNAGEOMIN (5) se actualizó mediante el trabajo interdisciplinario de antropólogos, historiadores y alfareros en una investigación histórica de las principales industrias de cerámicas y sus yacimientos, como también de la actividad histórica y actual a nivel artesanal en distintas comunas de la región, que permitió levantar información crucial para el empoderamiento de este arte a nivel patrimonial, cultural y turístico. Este insumo ayudó a comprender y asimilar lo potente que ha sido y sigue siendo la región del Biobío en la industria de la cerámica y el oficio de la alfarería, visibilizando el grandísimo valor histórico y actual que existe en el territorio en torno a esta actividad, tanto a escala industrial como artesanal. Esta información fue divulgada en redes sociales, ferias y actividades comunitarias, por medio de mapas interactivos, muestras de mano y microscopios, entre otros, realizando actividades en terreno para alfareros, turistas y entidades municipales, para así poner en valor la importancia de conocer el origen geológico de las arcillas y sus implicancias en la identidad de los territorios.

Es crucial entonces, para el empoderamiento y puesta en valor de este arte y oficio, conocer los detalles tanto de los fenómenos que llevaron a la formación de la materia prima, como también de sus características específicas, ya que en estos procesos y propiedades es donde se encuentra la mayor riqueza de los suelos, y son los que finalmente definen la singularidad de cada arcilla y greda que han sido utilizadas en la región del Biobío.

Palabras Clave: Arcilla, Cerámica, Región del Biobío, Divulgación de Geociencias.

Financiamiento: Proyecto impulsado por el Fondo Nacional de Desarrollo Regional, financiado por el Gobierno Regional Región del Biobío y ejecutado por Fundación Procultura.

Agradecimientos: Agradecimientos a Fundación Procultura y al equipo Componente 1: Artesanía. Agradecimientos a Aníbal Gajardo, por su ayuda y disposición.

Referencias:

- (1) Richards, G., & Raymond, C. (2000). Creative tourism. ATLAS news, 23(8), 16-20.
- (2) Carrasco, R., Gajardo, A., & Mendoza, J. L. (2003). Geología de yacimientos de arcillas plásticas para la elaboración de cerámica blanca y refractarios en las regiones VI y VIII, Chile.
- (3) Gajardo, A. (1991). Arcillas plásticas caoliníferas de las Planicies Litorales de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 456-459, Viña del Mar, Chile.
- (4) Gajardo, A. (1994). Arcillas plásticas caoliníferas de las provincias de Concepción y Arauco, Región del Bío Bío, Chile. In Congreso Geológico Chileno (No. 7, pp. 808-811).
- (5) SERNAGEOMIN. (2014). Base de datos de Recursos de Rocas y Minerales Industriales.

Plan Nacional de Geología abre sus puertas la comunidad con nueva Estrategia Comunicacional

Daniela Carolina Villela Olavarría¹, Edwin González Abarca¹, Felipe Espinoza González¹, Natalia Astudillo Leyton¹, Carlos Venegas Benavides¹, Cecilia Donoso Barrera¹, Esteban Salazar Pérez¹, Pablo Oliva Vicentelo¹, Víctor Villa Contardo¹, Paulina Vásquez Illanes¹, Felipe Fuentes Carrasco², Esteban Pérez Miranda³

(1) Sernageomin, Geología General

(2) Sernageomin, Geología Aplicada

(3) Sernageomin, Oficina de Comunicaciones

Después de 10 años de trabajo en cartografía geológica, geoquímica y geofísica del territorio nacional, el año 2020 el Programa Plan Nacional de Geología (PNG), desarrollado por el Departamento de Geología General de SERNAGEOMIN, lanzó una página web y, junto a ello, dio inicio a su estrategia comunicacional, iniciativa que busca dar a conocer el quehacer y la importancia de los estudios que realiza y publica regularmente el PNG, como también mejorar la accesibilidad a la información geocientífica y acercarse a la comunidad.

A través de la página web se pueden conocer las distintas unidades de trabajo, los integrantes de los equipos, sus proyectos y publicaciones. El sitio además contiene un visor de mapas ([GEOMAP](#)) donde el usuario puede visualizar los diversos estudios en desarrollo y publicados por las Unidades Técnicas que conforman el Programa (geología regional, geoquímica y geofísica). También se habilitó un blog de noticias y regularmente se envía por correo un newsletter a los suscriptores, donde se comparten novedades, nuevas publicaciones, anuncios, conmemoraciones, reconocimientos, entre otros.

Junto con lo anterior, se ha generado abundante contenido audiovisual, el que se distribuye a través de las redes sociales institucionales, algunos de los cuales están disponible para descarga en el sitio web: una Serie Animada llamada “geólogos” (7 capítulos), cápsulas de video-entrevistas a connotados especialistas en ciencias de la tierra y autoridades, infografías en diversas temáticas geológicas de interés para la comunidad, y abundantes fotos geológicas de terreno, de instrumentos, entre otros, que permiten acercar la labor geológica a la comunidad.

La Serie Animada es una forma llamativa y cercana de presentar información geológica de manera accesible. A través de personajes animados y narrativas sencillas, los espectadores pueden aprender sobre diferentes aspectos de la geología de una manera divertida. En las cápsulas de video-entrevistas, se presentan breves entrevistas a diversos profesionales usuarios de los productos que genera el Programa a profesionales de los equipos de trabajo de la institución. Estas entrevistas abarcan una amplia gama de temáticas relacionadas a la cartografía geológica del país, y en ellas los entrevistados comentan su parecer respecto de los productos y entregan recomendaciones al Programa para optimizar su impacto y resultados.

Las Infografías son una herramienta visualmente atractiva para presentar datos e información geológica de manera simple y didáctica en las Redes Sociales; en ellas se utiliza un lenguaje menos técnico y se explican fenómenos geológicos cuyos resultados pueden ser reconocidos por la comunidad en su entorno.

Por último, las fotos geológicas brindan la oportunidad de exhibir la diversidad de la geología del país; se presentan acompañadas de un texto explicativo breve, donde se destacan los elementos geológicos que se observan, las herramientas de trabajo, los equipos profesionales, entre otros aspectos relativos a la labor geológica.

A través de estas cuatro líneas de contenido, se busca ofrecer información geológica de manera variada y atractiva, de manera de lograr llegar a diferentes tipos de público y despertar así su interés por el fascinante mundo de la geología. Estos contenidos se han difundido en las plataformas de SERNAGEOMIN, como Instagram, Facebook, Youtube y la página web del programa, y han recibido una respuesta positiva por parte del público.

Después de casi 3 años desde su lanzamiento, la página web ha logrado atraer a más de 40.000 usuarios y ha recibido un total de 115.000 visitas. La audiencia abarca diversos rangos de edad, donde destacan especialmente jóvenes universitarios y profesionales (18-34 años). Además, recibe visitas de numerosos países, incluyendo Perú, México, Argentina, Estados Unidos, entre otros.

En cuanto al desempeño en redes sociales, se ha logrado un impacto significativo, con más de 24.000 “likes” en Instagram y cerca de 9.500 reproducciones en Youtube, para nuestras publicaciones.

A futuro, se continuará trabajando en esta línea de divulgación, desarrollando nuevos contenidos, actualizando permanentemente la página web, ampliando la participación en eventos presenciales (ferias, charlas, exposiciones y geotours), y desarrollando material de divulgación geocientífica con un enfoque inclusivo, dirigido a personas con discapacidad (ver Astudillo et al., este congreso).

Palabras Clave: Plan Nacional de Geología, divulgación de geociencias.

Referencias:

- Astudillo, N., Toledo, P., Espinoza, F., Medina, S., Troncoso, V., Villela, D., González, E., Arraño, J., Ramírez, J., 2023. Colección inclusiva de rocas, minerales y fósiles de SERNAGEOMIN: Geología para todos. XVI Congreso Geológico Chileno.

“Cuéntame una Geohistoria”, serie animada como herramienta para el entendimiento de los fenómenos naturales

Catalina Cabello Parada¹⁻²⁻⁶, Pas Toledo Rubilar⁴⁻⁵⁻⁶, Alfredo Rivas¹⁻⁶, Isabella Ciocca³⁻⁶

- (1) Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Ciencias Químicas, Concepción, Chile
 (2) Proyecto Núcleo Milenio El Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción, CYCLO, Chile
 (3) Xterrae Geología, Hernando de Aguirre 194 Of. 61, Santiago, Chile
 (4) Sociedad Geológica de Chile, Valentín Letelier 20 oficina 401, Santiago, Chile
 (5) Instituto para la Resiliencia ante Desastres, La Concepción 191 Of. 601, Providencia, Chile
 (6) Revista Ciencias de la Tierra, Chile

Terremotos, erupciones volcánicas y aluviones son algunos de los fenómenos naturales que estamos acostumbrados a escuchar en las noticias, y no es de extrañar, ya que Chile es un país que, por su contexto tectónico y climático, es sometido a diversos riesgos de desastres socio-naturales. La socialización de las Ciencias de la Tierra es una de las aristas fundamentales en la reducción de estos desastres, contribuyendo a la educación, su conservación en la memoria y a la cultura de la resiliencia.

Múltiples esfuerzos se han realizado para abordar esta socialización, sin embargo, hemos reconocido que uno de los grupos menos considerados son los niños y niñas de la primera infancia. ¿Nos hemos puesto realmente a pensar cómo perciben la ocurrencia de estos eventos los niños y niñas de preescolar (menores de seis años), quienes quizás ni siquiera han escuchado la palabra “temblor”? El proyecto “Cuéntame una Geohistoria”, en el marco del programa Ciencia Pública, nació con el objeto de entregar una herramienta a la comunidad educativa preescolar para transmitir algunos conocimientos de las Ciencias de la Tierra a la primera infancia. Este proyecto consistió en la elaboración de una miniserie animada de cinco capítulos que tratan sobre 1) erupciones volcánicas, 2) terremotos y tsunamis, 3) suelo y remociones en masa, 4) ciclo del agua e inundaciones, 5) sequía y cambio climático. Cada una de estas temáticas fueron abordadas situando a los protagonistas, Joaquín y Catalina, en lugares de nuestro país donde han ocurrido eventos de esta naturaleza en los últimos años. Además, se elaboró una guía en lenguaje sencillo para padres, apoderados y educadores de forma que puedan profundizar en estos conocimientos junto a los niños y niñas, con contenido complementario, experimentos y otras actividades. Se trabajó en conjunto con educadoras de párvulo, un antropólogo, ilustradores, animadores y una compositora musical. Este equipo multidisciplinario permitió que los conceptos técnicos propios de las geociencias se transformaran en una experiencia audiovisual que fuese capaz de atraer a las y los más pequeños.

Los adultos tendemos a subestimar la capacidad de los alumnos de preescolar de comprender y hacer suyos conceptos técnicos que ciertamente pueden ser complejos, pero que, con el tratamiento adecuado, pueden ser fácilmente incorporados. Creemos que abordar estos conceptos en los programas de educación temprana es fundamental, puesto que es una manera de formar jóvenes y adultos más resilientes ante los desastres socio-naturales, aprovechando la época en la vida en que son más curiosos y receptivos a las nuevas ideas, además de promover la comunicación y transmisión de conocimientos intergeneracional.

Se espera que la serie animada “Cuéntame una Geohistoria” siga creciendo, por lo que, como meta a corto plazo buscamos formar la Fundación Ciencias de la Tierra que, entre otras cosas, tendrá como objeto seguir generando productos de divulgación como este.

Palabras Clave: Educación, Divulgación, Geociencias, Preescolar, Desastres siconaturales.

Financiamiento: Financiado por "Productos de Divulgación del Programa Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2021)".

Agradecimientos: Programa Ciencia Pública - Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación y Xterrae Geología.

Referencias:

- <https://geohistorias.cl/>

La Falla San Ramón y la sostenibilidad del piedemonte de Santiago: Recomendaciones para la política pública

Gabriel Easton Vargas¹, Rubén Boroschek², Sofía Rebolledo¹, Jorge Inzulza³, Daniela Ejsmentewicz⁴, Paulina Vergara⁵,
Eduardo Giesen⁶

- (1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
(2) Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile
(3) Universidad de Chile, Departamento de Urbanismo, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Av. Portugal 84, Santiago, Chile
(4) Universidad de Chile, Facultad de Derecho, Pío Nono 1, Providencia, Santiago, Chile
(5) Universidad de Chile, Instituto de Asuntos Públicos, Sta. Lucía 240, Santiago, Chile
(6) Colectivo Viento Sur, Observatorio Precordillera, Santiago, Chile

La Falla San Ramón (FSR) se ubica a los pies del borde occidental de la cordillera de los Andes, a lo largo del piedemonte andino situado al oriente del valle Santiago. Constituye una fractura o zona de debilidad en la corteza terrestre, capaz de acumular esfuerzo tectónico y deslizar un bloque cortical respecto de otro, generando sismos superficiales. De acuerdo con los antecedentes científicos, esta falla es capaz de generar terremotos de gran magnitud con ruptura en superficie. Su potencial activación constituye una amenaza para la ciudad de Santiago y para toda la Región Metropolitana. Se trata de un elemento de riesgo no incluido en la política pública, cuya consideración resulta fundamental en pos de la sostenibilidad de la ciudad, puesto que una población cada vez mayor de personas vive directamente sobre su traza, o localización en superficie, así como en sus inmediaciones.

Se abordan los antecedentes científicos y de política pública en materia de fallas activas y reducción del riesgo de desastres en nuestro país (Easton et al., 2022). Se concluye con siete recomendaciones: (1) definir a la Falla San Ramón como una falla activa; (2) restringir la fundación de cualquier infraestructura en una franja de 300 m de ancho a lo largo de la traza de la Falla San Ramón, con posibilidad de realizar estudios para precisar la ubicación de esta franja en la superficie del terreno; (3) modificar la ordenanza, planes reguladores y norma sísmica de diseño para incorporar las fallas activas; (4) realizar estudios de peligro por remociones en masa, en zonas susceptibles, ante la potencial activación de la Falla San Ramón e incorporar estas áreas en los instrumentos de planificación regional y comunales; (5) asegurar la disponibilidad de información precisa y pertinente a la ciudadanía respecto de la ubicación, amenaza y riesgo sísmico de la Falla San Ramón; (6) definir la franja de restricción de la traza de la Falla San Ramón (300 m), como una zona de protección ambiental y conservación natural a lo largo del piedemonte cordillerano; y (7) definir una gobernanza para el diseño, implementación, monitoreo y evaluación de una planificación urbana sostenible, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y la política nacional y global en materia de Reducción del Riesgo de Desastres.

A la fecha no existen antecedentes de una política pública integral que considere en la práctica la amenaza y el riesgo que la Falla San Ramón constituye para Santiago, como tampoco respecto de otras fallas geológicas activas para otras ciudades o localidades en el país. Sin desmedro de lo anterior, a partir del presente siglo XXI se han desarrollado iniciativas pioneras en esta materia, en cuanto a la necesaria sinergia entre instituciones académicas y de gobierno, en pos de incrementar el conocimiento científico para sustentar políticas públicas que propendan a la reducción del riesgo de desastre asociado a la potencial activación de la amenaza de la FSR. Entre lo anterior destacan (i) Estudio Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón (2011-2012), desarrollado para la Seremi MINVU RM, con el cual se demostró el carácter activo de la FSR a través de estudios paleosismológicos; (ii) Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón (2016-2019), desarrollado para la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI; actualmente SENAPRED), de la Subsecretaría del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, con el cual se implementó el monitoreo sísmico de detalle de esta estructura geológica; (iii) la creación de dos comisiones investigadoras especiales de la Cámara de Diputadas y Diputados (2020-2021; y en curso), sobre permisos de construcción y acciones de instituciones del Estado para mitigar el riesgo de la FSR; (iv) un fallo del Segundo Tribunal Ambiental de la República de Chile (2021), que resolvió acoger parcialmente una reclamación interpuesta en contra de la Comisión de Evaluación Ambiental de la Región Metropolitana, solicitando más antecedentes sobre la actividad de la FSR respecto de un proyecto inmobiliario; (v) la elaboración (a partir de 2021) y publicación del Plan Específico de Emergencia Falla San Ramón (en curso), realizado por el SENAPRED con apoyo de la mesa de riesgo sísmico constituida al interior del mismo; y (vi) la solicitud formal del Gobernador de la Región Metropolitana de iniciar la modificación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) para incorporar la FSR, con la respuesta positiva e inicio del proceso por parte de la Seremi MINVU RM (2021).

En el marco de las iniciativas antes señaladas y de proyectos de investigación urbana y social, se han desarrollado una serie de actividades en conjunto con las comunidades que habitan el piedemonte de Santiago y la Región Metropolitana.

Palabras Clave: Santiago, Falla San Ramón, Riesgo Sísmico, Política Pública, Sostenibilidad.

Financiamiento: Proyectos: Estudio Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón (Seremi MINVU RM, 2012); Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón (CSN-ONEMI, 2019); ¿Planificación urbana en riesgo? Prácticas socioespaciales de comunidades en el piedemonte de Santiago, Chile y su incidencia en la Falla de San Ramón (FSR) como nuevo escenario de riesgo sísmico y sostenibilidad (Fondecyt 1190734); Hacia el desarrollo sostenible del territorio en el siglo XXI: Escenarios comunales contrastados y criterios normativos de habitabilidad en el piedemonte de Santiago ante la nueva amenaza sísmica de la Falla San Ramón (FSR) (Fondecyt 1230350).

Agradecimientos: A los equipos y estudiantes de los diferentes proyectos que han permitido incrementar el conocimiento de la Falla San Ramón en los últimos veinte años.

Referencias:

- Easton, G., Boroschek, R., Rebolledo, S., Inzulza, J., Ejsmentewicz, D., Vergara, P., Giesen, E. (2022). La Falla San Ramón y la sostenibilidad del piedemonte de Santiago: Recomendaciones para la política pública. Policy Brief, Santiago: Universidad de Chile, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, 16 p. DOI: <https://doi.org/10.34720/4t6n-hc49>, URL: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183864>.

Siguiendo las huellas de los gigantes de Kütralkura: comunicación del riesgo volcánico desde una experiencia participativa y transdisciplinar

Carolina Geoffroy Gómez¹, María Angélica Contreras Vargas²⁻³, Sofía Vargas Payera⁴⁻⁵⁻⁶, Gabriela Pedreros Delgado², Antonieta López Aravena⁷, Teresa Venegas Fernández⁸, Gabriela Tascón Fuenzalida³

- (1) Xterrae Geología
(2) Servicio Nacional de Geología y Minería
(3) Geoparque mundial UNESCO Kütralkura
(4) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes
(5) Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile
(6) Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
(7) Universidad Diego Portales
(8) Liceo Bicentenario Polivalente Lonquimay

Los volcanes de Chile se dividen en tres zonas volcánicas: Central, Sur y Austral. Aquellos que forman parte de la Zona Volcánica Sur de los Andes (33°- 46°S) son los que se encuentran más cerca de los centros poblados, particularmente en la zona centro-sur del país, que es donde habita la mayor parte de la población del país. El geoparque mundial UNESCO Kütralkura, en la región de la Araucanía, se encuentra en esta zona volcánica. Alberga seis volcanes activos y en particular dos de ellos: Lonquimay y Llaima, tienen erupciones históricas y son considerados de los más activos de Chile.

Por lo tanto, en las comunas que componen el geoparque existe una alta amenaza volcánica y a la vez sus habitantes se encuentran tremendamente expuestos a procesos volcánicos. Por otro lado, desde la revisión de la componente de la vulnerabilidad social ante amenazas, hay características individuales que determinan el nivel de afectación como el género, edad, pertenencia a un pueblo originario, discapacidades y acceso a la educación, entre otros (UNDRR, ONU Mujeres; 2022). Según la encuesta CASEN 2020, en la región de la Araucanía el 28,3% de la población es rural, un 53,8% de la población son mujeres, un 31,3% de la población es parte de algún pueblo indígena y la tasa de pobreza por ingresos es de un 17,4%, lo cual la convierte en la región más pobre del país.

Es en este contexto, y bajo la premisa de que los desastres no son naturales, estamos desarrollando un proyecto de divulgación científica y comunicación del riesgo con perspectiva de género que consiste en la construcción de una guía de exploración volcanológica para jóvenes habitantes del geoparque Kütralkura. Este proyecto se está ejecutando en coordinación con la Asociación de Municipalidades Cordilleranas de la Araucanía y es financiado por el programa Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Nuestra propuesta se basa en el enfoque de comunicación científica etnográfico-contextual (Cortassa, 2012), el cual busca entender el contexto del público objetivo y generar un diálogo horizontal con éste. Bajo este enfoque, la construcción de la guía de exploración volcanológica se está realizando a partir de una experiencia práctica y participativa transdisciplinar de codiseño, con el fin de integrar ideas desde diferentes perspectivas.

La construcción de la guía está a cargo de geólogas, una investigadora social, diseñadoras gráficas, docentes del territorio y una educadora tradicional mapuche. Se está desarrollando con 35 jóvenes mujeres, de entre 14 y 18 años, pertenecientes a liceos públicos de las comunas que conforman el geoparque. Dos talleres y un campamento de cuatro días corresponden a los insumos principales de la guía. En estas instancias participativas, estamos llevando a cabo cuestionarios y actividades participativas de discusión, que permiten recabar información cuantitativa y cualitativa para integrar las distintas miradas de científicas y jóvenes.

Hasta ahora, el análisis de estas instancias ha permitido realizar cambios en la propuesta original de diseño y de contenidos. Las jóvenes han manifestado interés por identificarse con los personajes ilustrados de la guía, por incluir elementos del territorio como zorros y araucarias. Además, se ha logrado levantar las percepciones y las dudas de las jóvenes en torno a los volcanes: ¿Qué se hace durante una erupción?, ¿Qué hay bajo un volcán?, ¿Cómo funciona un volcán?, entre otras.

Por otro lado, a partir de la discusión y reflexión con las participantes del equipo que son del territorio se han tomado decisiones en torno a cómo incluir un conocimiento intercultural y local, entendiendo que gran parte de los habitantes del territorio pertenecen al pueblo Mapuche y han vivenciado las erupciones de los volcanes Lonquimay y Llaima. Principalmente, y a diferencia de otras guías donde los contenidos están segmentados, en este proceso se está optando por la integración de los saberes (científicos, locales y culturales) en cada capítulo, presentando los contenidos en español y mapudungun.

Actualmente nos encontramos en la etapa de diseño de la guía, la cual culminaría en noviembre de este año, y la guía será publicada durante inicios del 2024, mediante lanzamientos territoriales. Buscamos que con esta guía las jóvenes adquieran conocimientos culturales y científicos relacionados a los volcanes del territorio, las amenazas volcánicas presentes, experiencias locales de erupciones previas y el reconocimiento de zonas seguras. De esta forma, esperamos contribuir a fomentar entre las jóvenes una cultura de prevención y a aumentar su resiliencia ante posibles erupciones.

Palabras Clave: Peligros volcánicos, Transdisciplina, Perspectiva de género, Comunicación del riesgo, Codiseño.

Financiamiento: Concurso Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Agradecimientos: A las instituciones asociadas: Sernageomin, Xterrae Geología, Sociedad Geológica de Chile, Departamento de Geología de la Universidad de Chile y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes.

Referencias:

- Cortassa, C. (2012). La ciencia ante el público. Dimensiones epistémicas y culturales de la comprensión pública de la ciencia.
- UNDRR, ONU Mujeres (2022) Hacia la igualdad de género y el liderazgo de las mujeres para la resiliencia ante el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe

Gestión del Riesgo en Actividades en Zonas Agrestes y Remotas

Daniel Ignacio Martínez Olguín¹⁻²

(1) Universidad Austral de Chile, Geología, Ciencias, Independencia 630, Valdivia, Chile
 (2) Socorros y Emergencias SPA, Escuela de Capacitación en Socorrismo y Emergencias, Santiago, Chile

Las actividades en zonas remotas, tales como el montañismo, actividades de distensión o trabajos de campo en Geociencias, por su naturaleza implican riesgos [3]. El riesgo consiste en cómo nos enfrentamos a los peligros. El peligro que para una persona preparada y capacitada implica una posibilidad de algún incidente (accidente sin lesiones), para una persona ignorante o principiante probablemente terminaría en un accidente serio; la diferencia está precisamente en el conocimiento, actitud y percepción respecto del mismo peligro [5]. La naturaleza, las montañas o las cavernas poseen características intrínsecas que no pueden ser cambiadas por la presencia del ser humano. Lo que sí puede ser cambiado es el mismo humano frente a la misma situación [4]. A estos dos aspectos se les conoce como peligros objetivos y subjetivos [6; 9], los cuales se describen más abajo.

El Riesgo puede definirse como la probabilidad de que una amenaza se convierta en un problema, dependiendo de mi vulnerabilidad [1]. En una definición más científica, Riesgo se define como el producto de la probabilidad de ocurrencia de un suceso y las consecuencias que necesariamente lo acompañan (generalmente negativas) [8]. Y expresada como ecuación, Riesgo es igual al producto entre Peligro, Vulnerabilidad y Exposición [5]. Debido a esto, la Gestión del Riesgo es un aspecto fundamental en una actividad en zonas remotas, dada la vulnerabilidad que tenemos como personas y las acciones que nos exponen a dichos peligros [2]. Por lo tanto, las acciones y decisiones que podemos tomar para disminuir ese riesgo y cómo deberíamos actuar ante un imprevisto que afecte nuestra actividad, como un accidente, es algo que debemos considerar en nuestra planificación [9].

En este sentido, es importante mencionar accidentes trágicos como el de María Angélica Fontt, primera mujer Geóloga formada en Chile, fallecida en mayo de 1987 en un accidente automovilístico volviendo de su faena en la cordillera de Rengo; también el de Cristián Contreras Ferreira, estudiante de Geología UACH, quien falleció el 9 de junio de 2018 en Neltume durante la salida a terreno de la asignatura Geología de la Patagonia, debido a una fractura craneal por un desprendimiento de rocas que afectó al grupo en el sector La Cantera, con 8 heridos más [5]. Así mismo, ha habido muchos otros accidentes de distinta envergadura en la historia de la Geología en Chile, por lo cual es fundamental que como Geólogos/os y Geocientistas en general comprendamos la importancia de gestionar la Seguridad y el Riesgo en las salidas a terreno y las acciones personales previas como la capacitación en Primeros Auxilios. Pero a pesar de todo lo que hagamos para disminuir este riesgo, nunca estará ausente completamente [7].

PELIGROS OBJETIVOS. Son procesos y condiciones naturales que existen independientemente de la presencia del ser humano, dados por las características del medio, terrenos inestables o expuestos, desprendimientos y caídas de rocas, agentes atmosféricos, terremotos o erupciones volcánicas. Nada podemos hacer para evitar que sucedan, pero sí podemos aprender a reconocer los lugares y momentos potencialmente peligrosos para tratar de no estar allí cuando éstos se den.

PELIGROS SUBJETIVOS. Tienen su origen en los actos y cualidades personales que, combinados con los peligros objetivos, pueden afectar la actividad (interacción riesgosa [5]). El enorme desconocimiento de lo que es la montaña y los ambientes agrestes se incrementa con una planificación deficiente, equipo inadecuado, no tomar en cuenta los cambios atmosféricos, falta de sensatez, inexperiencia, y las limitaciones de las capacidades físicas y técnicas. En pocas palabras, los peligros subjetivos son siempre descuidos o errores cometidos por uno mismo y representan más del 80% de los accidentes reportados [5; 6; 9].

En esta presentación se pretende explicar el qué, cómo y por qué aplicar la Gestión del Riesgo, los principios y la ecuación del Riesgo (similar al riesgo geológico), así como la Gestión de las Vulnerabilidades y los tipos de peligros en las zonas agrestes y remotas, además de mostrar como ejemplo el reglamento para las salidas a terreno en la UACH, incluyendo una Matriz de Riesgos, los cuales redactamos a raíz del accidente de nuestro compañero en 2018 y se aplica desde entonces en cada salida a terreno programada por la Escuela de Geología UACH.

Palabras Clave: Riesgo, Primeros Auxilios, Accidentes, Error Humano, Peligros.

Referencias:

- [1] Amalberti, R. (2009). La acción humana en los sistemas de alto riesgo. Modus Laborandi.
- [2] Amat, J. I. (2017). Seguridad en montaña. Los peligros ocultos. Desnivel.
- [3] Ayora, A. (2016). Gestión del riesgo en montaña y en actividades al aire libre. 4ta Ed. Desnivel.
- [4] Chamorro, A., & Fernández-Castro, J. (2009). The perception of causes of accidents in mountain sports: a study based on the experiences of victims. Accident Analysis & Prevention, 41(1), 197-201.
- [5] Fica, R. (2020). No me Olviden: Primera Aproximación al Fenómeno de la Accidentabilidad en los Ambientes de Montaña Vinculados a Chile Debido a Interacción Riesgosa 1900-2019. Versalita Ediciones. Santiago, Chile.
- [6] Martínez, I. S., Hirsch, A. A., Alegret, B. E., Junoy, G. S., & Bayego, E. S. (2021). El factor humano en los accidentes de esquí alpino y snowboard. Archivos de medicina del deporte: revista de la Federación Española de Medicina del Deporte y de la Confederación Iberoamericana de Medicina del Deporte, 38(202), 91-98.
- [7] REASON, J. (2008). El error humano. Madrid: Modus Laborandi. [Edición original: Human Error. Nueva York: Cambridge University Press, 1990.].
- [8] Sheridan, T. B. (2008). Risk, human error, and system resilience: fundamental ideas. Human factors, 50(3), 418-426.
- [9] Wick, J. (Ed.) (2004). Prevención y Actuación en Emergencias. En Cox, S. (Ed.) (2004) Montañismo: La Libertad de las Cimas. 7ma Ed. 528-297. Desnivel Editores.

Civur39: Centro interactivo vulcanológico de la Araucanía

Marcel Sorhaburu¹, **Nicolas Mendoza**², Amaranta Palma¹, Pablo Obreque¹, Rodrigo Garrido¹, Francisco Bucchi²

(1) Universidad de La Frontera, CIVUR39, Campus Pucón, Chile

(2) Geolmagen, Temuco, Chile

El volcán Villarrica ocupa el primer lugar en el ranking de riesgo específico del SERNAGEOMIN siendo también uno de los volcanes más activos de Sudamérica. Esto lo convierte en un laboratorio natural invaluable para el estudio de los procesos volcánicos y la comprensión de la dinámica interna de la Tierra. Su constante monitoreo y estudio proporcionan valiosa información sobre los mecanismos eruptivos, la evolución de los sistemas magmáticos y los riesgos asociados. Además, la presencia de numerosas zonas pobladas en las cercanías del volcán y la alta afluencia de población flotante que lo visita regularmente hace imprescindible amplios esfuerzos para generar una comunicación adecuada sobre el volcanismo y los peligros volcánicos, con el fin de aumentar la conciencia y conocimiento del riesgo al que las personas podrían verse expuestas, evitando posibles catástrofes debido a la falta de comprensión de estos fenómenos naturales.

Con el objetivo de promover en la comunidad lacustre, regional y nacional el conocimiento sobre estas temáticas, el Campus Pucón de la Universidad de La Frontera crea el 2021 mediante un trabajo interdisciplinario el Centro Interactivo Vulcanológico de La Araucanía CIVUR39, este proyecto, que se enmarca en el ámbito de la ciencia ciudadana, tiene como objetivo ser un aporte real a la comunidad y un lugar de trabajo para investigadores que estudien el volcanismo, especialmente enfocados en el Volcán Villarrica y la gestión del riesgo. Una de sus iniciativas es la muestra museográfica "Desde los Orígenes hasta el Corazón del Volcán Villarrica", la cual ofrece una experiencia científica, interactiva e intercultural sobre los volcanes. A través de su relato, se aborda el origen y la importancia del volcanismo en la Tierra, la cosmovisión de culturas ancestrales, la historia del Volcán Villarrica, sus erupciones pasadas y presentes, así como su profundo impacto en el entorno geográfico y cultural.

La exhibición cuenta con 7 salas dedicadas a la temática volcánica, donde se utiliza tecnología de punta para generar un ambiente didáctico e inmersivo con el fin de explicar el funcionamiento de los volcanes y su importancia para el planeta. Entre algunos de sus desarrollos se encuentra el relato de la cosmovisión del pueblo Mapuche mediante una proyección de hologramas y espejos. La sala Cenizas donde encontramos testimonios de actores sociales y habitantes locales explicando su relación con el volcán mediante sistemas sonoros y sensores de movimiento. La máquina del tiempo del volcán Villarrica, desarrollo que recrea mediante animaciones su evolución, desde el nacimiento hasta su estado actual. La mochila de emergencia, un juego interactivo donde mediante una pantalla táctil los visitantes deben decidir cuáles son los elementos prioritarios en caso de una erupción. La sala Fumarolas donde es posible observar en tiempo real el monitoreo que realiza el observatorio vulcanológico (OVDAS). La sala Rukapillan donde se explica la dinámica de los volcanes y donde se corona la exhibición con el Video Mapping de peligros volcánicos, realizado sobre una impresionante maqueta del Vn. Villarrica de dimensiones 4x3x0.9 metros donde se proyecta la animación de una erupción volcánica. Además, se cuenta con una Sandbox de realidad aumentada dispositivo que permite modelar el relieve en tiempo real para enseñar diferentes conceptos de las ciencias de la Tierra.

Este es una iniciativa que busca impulsar el desarrollo local y el turismo vulcanológico, es un espacio donde disfrutan grandes y chicos, el cual hasta el momento ha sido visitado por decenas de colegios y cientos de personas, un lugar donde la ciencia y conocimiento se desarrollan a los pies del volcán, que busca conectar y concientizar a la población sobre las consecuencias y beneficios del volcanismo, un espacio de interculturalidad que compartimos en la Araucanía. Un proyecto de gran magnitud donde se genera un aporte cultural, turístico, educacional y científico importantísimo para la zona lacustre, la Región y el país.

Palabras Clave: Interactivo, tecnología, innovación, comunidad, comunicación.

Aplicación de Video Mapping sobre peligros volcánicos en maquetas 3D como una herramienta de comunicación a la comunidad

Diego Zamorano Morales¹, Nicolás Mendoza², Virginia Toloza³, Felipe Fuentes⁴, Francisco Bucchi²

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

(2) Geoimagen SpA, Palermo Parcela 8 Lote 2-2, Padre Las Casas, Chile

(3) Sernageomin, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Chile

(4) Sernageomin, Departamento de Geología Aplicada, Chile

Chile posee actualmente 90 volcanes catalogados como activos por el SERNAGEOMIN, muchos de ellos con población viviendo en zonas aledañas. Por lo anterior, se hace imprescindible generar una comunicación adecuada sobre los peligros volcánicos, con el fin de aumentar la conciencia y conocimiento del riesgo al que podrían verse expuestos, evitando una catástrofe producto de la poca comprensión de fenómenos naturales.

Una forma de transmitir esta información de manera eficaz son los modelos 3D. Estos cuentan con ciertas ventajas por sobre los mapas bidimensionales, pues al mostrar la geomorfología de una zona, se logra concebir y dar a entender de mejor forma la dinámica y comportamiento de los peligros volcánicos, que están condicionados por la topografía del terreno como lahares y flujos piroclásticos, que son los menos conocidos y más destructivos.

Sobre la maqueta se proyectan diversos tipos de coberturas como: imágenes satelitales, mapas geológicos y de peligros volcánicos, entre otros, permitiendo visualizar la información de forma creativa. Este trabajo se enfoca en la complejidad de imaginar cómo se generan y desarrollan algunos de los peligros volcánicos más violentos, como los flujos piroclásticos.

Para aportar a la solución de este problema hemos desarrollado a través de la técnica de video mapping la proyección de dos animaciones de la erupción de un volcán la cual se adapta a superficies reales para conseguir un efecto artístico y fuera de lo común basado en los movimientos que crea el 3D. Esta proyección se encuentra en dos formatos, una portátil en una maqueta de 130x80x20 cm perteneciente al SERNAGEOMIN y otra en una instalación fija sobre una maqueta de 4x3x0.9 metros perteneciente al Centro interactivo vulcanológico de la Araucanía (CIVUR39).

Estos proyectos han sido presentados en diversos eventos y ferias de divulgación científica como puerto de ideas en Antofagasta y las Ferias de Divulgación Volcánica, organizada por la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) de SERNAGEOMIN en diferentes localidades del país, mientras que el video mapping de mayor tamaño en el CIVUR39 ha sido visitado por decenas de colegios y cientos de personas desde su inauguración en enero de 2023. Estos proyectos permiten que la comunidad se eduque de una forma interactiva y visualmente atractiva sobre las implicancias que tiene vivir en las cercanías de volcanes y comprender claramente la diversidad de los peligros volcánicos en su contexto geográfico.

Palabras Clave: Narración Virtual, Video Mapping, Peligros volcánicos, Volcanología, Maquetas.

Fundación Geonautas: únete a explorar nuestro Planeta Tierra

Javier Ojeda¹⁻²⁻⁹⁻¹⁰, Catalina Morales-Yáñez¹⁻³, Andrés Martínez¹⁻⁴, Emilio Concha¹⁻⁵, Angela Bahamondes Domínguez¹⁻⁶, Vanessa Carrillo-Barra¹⁻², María Belén de la Torre¹⁻⁷, Sebastián Carrasco¹⁻⁸, Blanca Symmes Lopetegui¹⁻⁷

- (1) Fundación Geonautas, Chile
- (2) Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Santiago, Chile
- (3) Universidad Católica de la Santísima Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Concepción, Chile
- (4) Meteodata Ltd., Santiago, Chile
- (5) Université de Toulouse III, CECL, Toulouse, France
- (6) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, Coquimbo, Chile
- (7) Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica, Concepción, Chile
- (8) University of Cologne, Bensberg Earthquake Observatory, Cologne, Germany
- (9) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile
- (10) Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

Chile posee una serie de características geológicas que lo sitúan como una región ideal para el estudio de las Ciencias de la Tierra. Además, su accidentada geografía lo convierte en un lugar altamente expuesto a desastres socio-naturales. Estos elementos inciden y dan estructura al estilo de vida y el día a día de quienes habitan este territorio. Reconociendo la estrecha relación de las personas con los fenómenos naturales que experimentan, decidimos crear una organización que promueve una sociedad consciente y mejor preparada ante un próximo desastre. En el presente trabajo, compartiremos nuestras experiencias desde la vitrina de una fundación, enfocándonos en cómo este tipo de asociaciones permiten sociabilizar y contribuir a acotar la brecha entre ciencia y comunidad.

Fundación Geonautas es una organización sin fines de lucro que está constituida por personas ligadas al ámbito científico y profesional de las Ciencias de la Tierra y Planetarias. Buscamos contribuir, apoyar y potenciar la difusión y divulgación del conocimiento geocientífico en la comunidad, con un enfoque principal hacia la promoción de una cultura de reducción de riesgo de desastres. Para cumplir esta finalidad, las y los integrantes de la fundación han trabajado en la planificación, creación, presentación y disposición de material audiovisual de acceso libre y gratuito dirigido a públicos específicos y diversos. Originalmente orientado en redes sociales para un público masivo, nuestro contenido y mensaje lo hemos adaptado para públicos específicos, por ejemplo en charlas a colegios y sus respectivos niveles. La alianza y apoyo con otras organizaciones ha sido fundamental para lograr estos objetivos. En específico, gracias a la colaboración con socios estratégicos nacionales como los PAR Explora, hemos realizado labores de divulgación de manera remota y presencial mediante diversas asesorías científicas, talleres, reuniones, congresos regionales, participación en ferias científicas, y charlas en instituciones de educación pública y privada. Entre ellas, destacamos (1) las asesorías científicas en colegios de La Pintana y Melipilla con el laboratorio de Sismología y de Zeolitas, respectivamente, (2) nuestra participación en el Festival de Ciencia, promoviendo el uso y cuidado de recursos hídricos, empleando variadas estrategias de comunicación y métodos activos de aprendizaje, (3) el apoyo en muestras itinerantes y charlas que promueven la comprensión de fenómenos naturales o procesos ambientales y geológicos; y por último (4) la traducción e implementación de una guía de comunicación sobre “cómo enfrentar la información falsa de terremotos”, una colaboración internacional establecida con el EMSC y ETH Zurich.

Finalmente, destacamos la ventaja de comunicar desde la formalidad jurídica que entrega una fundación y además por sus labores con alto interés para la promoción, desarrollo e incentivo en diversas actividades bien recibidas y reconocidas por la comunidad. De esta manera las y los integrantes de Fundación Geonautas, han logrado participar como mediadores de conocimiento y cooperadores con sus diversos públicos objetivos.

Palabras Clave: Comunicación en Geociencias, Sociabilización, Proyectos interdisciplinarios, Reducción de Riesgo de Desastres, Fundación Geonautas.

Financiamiento: JO agradece el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2020-21200903. CM-Y agradece el financiamiento de ANID/FONDECYT 3220307. AB agradece el financiamiento de ANID/FONDECYT Postdoctorado 3230188.

Animación y modelado 3D en geociencias: Un enfoque innovador para la divulgación y el entendimiento de procesos y peligros geológicos

Aníbal Rivera Herrera¹, Cristóbal Godoy Garrido¹, Diego Vega²

(1) Universidad Austral de Chile, Escuela de Geología, Valdivia, Chile

(2) GEF Humedales costeros, San Martín 73, piso 7, Santiago

El principio del uniformitarismo establece que los procesos geológicos que ocurren en la actualidad son los mismos que han ocurrido a lo largo de la historia del planeta, si lo relacionamos con el peligro geológico, podemos determinar que estos eventos son periódicos y por consiguiente, sucederán nuevamente en el tiempo. Dicho lo anterior, la comprensión de estos, por parte de la comunidad, es de vital importancia para que se genere conciencia de nuestro entorno y se mitiguen futuras catástrofes en el territorio. Para conseguir la comprensión de estos procesos es necesario innovar en nuevos productos (didácticos, interactivos y tecnológicos) para que exista mayor vinculación entre la comunidad geocientífica, la investigación y la población en general. Para esto se deben desarrollar instancias y canales educativos que consideren una simplificación del vocabulario técnico, que enfatice en lo gráfico y que permita un entendimiento claro.

En la actualidad, la divulgación geocientífica ha ido evolucionando y desarrollándose exponencialmente, cada vez son más los actores que se interesan y participan de divulgación científica generando impacto, interés y aprendizaje en los usuarios. Encontramos páginas de difusión, aplicaciones móviles, ferias científicas, maquetas interactivas, dispositivos de realidad virtual y aumentada, juegos de mesa, entre otros. Sin embargo, sigue siendo algo en lo que la comunidad científica se encuentra al debe con la población y resta mucho trabajo por realizar tanto con niños y adultos, pero también con instituciones públicas y municipios. El producto que se pretende presentar y difundir en esta instancia corresponde a animaciones 3D de procesos y peligros geológicos que, mediante uso de softwares de modelamiento y animación, permite simular y replicar sucesos que signifiquen riesgo para asentamientos urbanos y su patrimonio, en donde se observe de manera gráfica y clara la manifestación de estas amenazas naturales pero también sus devastadoras implicancias. Es esta tecnología de desarrollo digital y base científica la que pretende aportar en difusión y educación en torno a peligros geológicos, proporcionando una experiencia visual y didáctica, que se suman a todas las herramientas de difusión ya mencionadas.

Algunas de las ventajas del uso de software para modelado 3D con enfoque en difusión de ciencias y mitigación de peligro son que entregan una visualización más clara, inmersiva y detallada de procesos complejos o sucesos históricos en específico, muestran múltiples perspectivas de estos y generan un impacto emocional en el espectador. Todas estas características permiten que las animaciones 3D sean una herramienta muy efectiva para la divulgación de geociencias, y más aún para simular eventos futuros que signifiquen un riesgo hacia la comunidad. Aún más cuando el datum utilizado en el modelo corresponde a datos geoespaciales del territorio en cuestión.

El uso de datos geoespaciales para el modelamiento 3D, permite simular los procesos sobre paisajes realistas que representen fielmente el entorno, a escala y en una región o localidad determinada, considerando la geomorfología del territorio y relieve real del área. La utilización de estas herramientas permitiría incluso simular escenarios de inundación, evidenciar zonas propensas a remoción en masa y estimar el comportamiento de productos volcánicos previo a una erupción. Por otra parte, estos modelos se enriquecen utilizando mapas existentes (de peligro volcánico, inundación, tsunamis, remoción en masa, etc.) que proporcionan información valiosa sobre los riesgos relacionados a determinadas áreas, la geometría y extensión del depósito.

Esta propuesta busca marcar un precedente en la divulgación científica al brindar una forma innovadora, didáctica y atractiva de comunicar y educar sobre los riesgos geológicos a la población respecto a eventos que han ocurrido en el pasado y que por el principio de uniformitarismo es probable que ocurran nuevamente. En última instancia, estas simulaciones a escala nos ayudan a comunicar y educar a la comunidad sobre los peligros y sus implicancias en el territorio para la toma de decisiones informadas por parte de autoridades y desarrollar protocolos de evacuación según corresponda.

Palabras Clave: Animación, Peligro Geológico, Modelo 3D, Divulgación científica.

Aprende Resiliencia: Un apoyo a las comunidades educativas para expandir el conocimiento en resiliencia ante desastres

Pas Victoria Toledo Rubilar¹

(1) Instituto para la Resiliencia ante Desastres (Itrend), La Concepción 191, oficina 601, Providencia, Chile

Aprende Resiliencia es una plataforma educativa de acceso libre y gratuita, creada por el Instituto para la Resiliencia ante Desastres (Itrend), con el objetivo de expandir el conocimiento y cultura de la resiliencia ante desastres en la comunidad educativa del país. La plataforma pone a disposición, de educadoras de párvulos y profesores, más de 150 recursos educativos creados en base al Currículum Nacional considerando diversos objetivos de aprendizaje que abordan directa o indirectamente los desastres socionaturales, tanto de origen natural, biológico o antrópico. Además, la plataforma contiene otras secciones, como actividades extracurriculares, biblioteca y el minisitio escuelas resilientes, donde se puede encontrar material de apoyo psicosocial.

Sumado a los recursos educativos disponibles en la plataforma, Aprende Resiliencia ofrece diversos talleres, tanto para profesores como para estudiantes, con temáticas relacionadas a los principales fenómenos naturales que afectan al país y desarrollados en base a los objetivos de aprendizaje de cada asignatura y nivel educativo. Desde su puesta en marcha Aprende Resiliencia ha realizado más de 150 talleres donde han participado más de 3.000 estudiantes y profesores en 8 regiones del país.

Colaboración destacada: Cápsula sobre Mapa Multiamenaza junto a CIGIDEN

Con el objetivo de que los estudiantes de enseñanza media analicen, a partir de modelos, las amenazas de origen natural o provocados por la acción humana en su contexto local, se desarrolló el recurso educativo titulado "Primer mapa multiamenaza en Chile: ¿de qué trata?", orientada a los alumnos de 3° y 4° medio del país, para ser implementada en las asignaturas de Ciencias para la Ciudadanía y Geografía, Territorio y Desafíos Socioambientales.

La cápsula fue elaborada por Itrend en el marco de la colaboración con el Centro de Investigación para la Gestión del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), quienes a través del proyecto SIGMA: Sistema de Información Geográfica Multiamenaza, financiado por FONDEF 19i10021 y en conjunto con investigadores de la Universidad Católica del Norte (UCN), Pontificia Universidad Católica de Chile (UC) y la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), realizaron una reconstrucción espacial de todas las amenazas que concurren en la Cuenca del Río Maipo, unidad geográfica seleccionada por su gran densidad poblacional, donde se concentra casi la totalidad de la Región Metropolitana y parte de la Región de Valparaíso y la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, existiendo un total de 163 localidades pobladas, de las cuales 22 son ciudades y el resto corresponden a poblados y asentamientos rurales, sumando un total de más 7 millones de personas [1].

Este recurso educativo fue implementada durante el segundo semestre del año 2022 a estudiantes de 4° medio del Liceo Augusto D'Halmar de la comuna de Ñuñoa en la asignatura de Historia y Geografía y Desafíos Socioambientales a través de los objetivos de aprendizaje OA5: "Reconocer el carácter social del riesgo de desastres que caracteriza a la geografía de Chile, considerando los diferentes usos del espacio y sus condiciones territoriales y ambientales" y OA6: "Recoger, sistematizar y comunicar información sobre procesos y dinámicas especiales, mediante el uso de estrategias y metodologías propias de la geografía, tales como interpretación y análisis de cartografía, georreferenciación y uso de imágenes, estadísticas e información geográfica, trabajo de campo, entrevistas, encuestas, mapeo participativo, escalas de percepción, entre otros".

Los talleres se realizaron presencialmente a través de 6 clases, de 12 horas pedagógicas en total y fueron desarrolladas entre la sala de computación y la sala de Historia y Geografía del establecimiento educacional. Además de conocer el proyecto SIGMA, los estudiantes confeccionaron sus propios mapas multiamenazas de las regiones Valparaíso, Metropolitana y Concepción, ubicando: volcanes y su posición en el ranking de riesgo específico de volcanes activos de Chile, zonas de inundación por tsunamis, zonas de remociones en masa, lugares con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, utilizando diferentes plataformas territoriales como Portal Geomin, elaborado por SERNAGEOMIN, Visor Chile Preparado elaborado por la SENAPRED y la plataforma SIGMA para las amenazas presentes en la Región Metropolitana.

Aprende Resiliencia busca seguir desarrollando este tipo de recursos educativos en conjunto con investigadores o proyectos nacionales, actuando como agentes socializadores en el sistema escolar de los resultados y avances en el ámbito de la resiliencia ante desastres en el país.

Palabras Clave: Educación, Resiliencia, Desastres socionaturales, Mapa multiamenaza.

Financiamiento: Instituto para la Resiliencia ante Desastres es financiado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y mandatado por el Estado de Chile.

Agradecimientos: A todos los establecimientos educacionales que nos han abierto sus puertas para poner en marcha el proyecto Aprende Resiliencia desde el año 2021.

Referencias:

- [1] González, G., Jensen, E., Aron, F., Roldán, F., Sáez, E., Díaz, F., Candía, G., Gironás, J., Escarriaza, C., Saldías, J., Aranguiz, R., Gilbert, H., De la Barra F., Zúñiga, A. (2022). Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19i10021.

J.B. Hatcher: de expedicionario renombrado a contrabandista de fósiles

Beatriz Aguirre-Urreta¹

(1) Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Ciudad Universitaria, CABA, Argentina

Son conocidas por muchos las expediciones de John Bell Hatcher a la Patagonia a fines del siglo XIX, en aquel entonces financiadas por la Universidad de Princeton. En especial en Chile son importantes sus investigaciones geológicas y paleontológicas en el Río de la Minas, cerca de Punta Arenas, donde levantó secciones estratigráficas y coleccionó abundantes invertebrados fósiles.

Sin embargo, poco se sabe de las graves vicisitudes que pasó Hatcher al contrabandear a Chile fósiles que había recogido en la Patagonia Austral Argentina, en las cercanías de Río Gallegos. Él sabía de la existencia de al menos un decreto en Argentina de mediados de 1860 donde quedaba claramente establecido que *“se prohíbe absolutamente la extracción de restos de animales fósiles sin expreso permiso del Gobierno....”*. Es por ello por lo que en su narrativa de las expediciones encontramos estas palabras *“Debido a ciertas leyes que prohíben la exportación de fósiles desde el territorio argentino, no nos disgustó en absoluto esta oportunidad de enviar este segundo envío de regreso a casa”*. Se refiere a la oportunidad de enviar sus cajones repletos de más de cuatro toneladas de fósiles en la goleta Patria desde las cercanías de Río Gallegos hasta Punta Arenas para que, desde allí, la compañía Braun & Blanchard los enviase por barco a vapor a Nueva York. Teniendo en cuenta la importancia del cargamento de fósiles enviados, Hatcher decide trasladarse él mismo hasta Punta Arenas para ocuparse personalmente del reembarque a Nueva York.

La distancia a recorrer era algo más de 360 kilómetros y a pesar de que ofrecieron prestarle un caballo, Hatcher lo declina ya que considera a éste un viaje insignificante si lo compara con los que acostumbra a hacer en su país de quinientas a mil millas. A poco de haber partido, tiene un grave accidente con su caballo que le produce un fuerte golpe en la cabeza y una herida sangrante en el cuero cabelludo. Después de numerosas contingencias a lo largo del viaje, detalladamente comentadas en su libro, una semana después de su partida llega finalmente a Punta Arenas, habiendo cambiado de caballo y con la herida inflamada y supurando libremente. Su encuentro con los dos médicos en Punta Arenas tampoco es favorable y decide recuperarse en su hotel comprando algunos remedios y vendajes en la farmacia. Es así como luego de esta odisea logra acomodar los cajones de fósiles que se encontraban desparramados y a la intemperie en el muelle esperando su embarque final. A fines de noviembre logra volver al norte de Gallegos y reunirse con su ayudante para seguir sus expediciones y continuar enviando fósiles a Nueva York, a pesar de haberle costado casi la vida este viaje de contrabando.

Palabras Clave: Patagonia, Expediciones, Contrabando, Fósiles, J.B. Hatcher.

Antropoceno: Una síntesis en torno a las discusiones y críticas que ha generado este concepto propio de nuestros tiempos en la comunidad científica y en la cultura popular

Cristian Andrés Bastías Curivil¹

(1) Universidad de Chile, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Ercilla 803, Santiago, Chile

El Antropoceno es un concepto que ha sido propuesto por algunos miembros de la comunidad científica para designar a la nueva época en que el ser humano se ha convertido en una fuerza de transformación con alcance global y geológico, cambiando la configuración y el funcionamiento de la Tierra de manera tan profunda que la diferenciaría de la época geológica anterior: el Holoceno. El químico neerlandés Paul Crutzen, y el biólogo Eugene Stoermer acuñaron este término en el año 2000, llamando así al tiempo en el cual las actividades humanas de la era industrial alteraron las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y, por lo tanto, afectaron el clima de la Tierra. Situaron su comienzo a finales del siglo XVIII, momento en que se incrementaron paulatinamente las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄ por encima de los valores anteriores a más largo plazo como consecuencia de la Revolución Industrial. Dicho incremento quedó registrado en el aire atrapado en hielos antárticos, mostrando con gran detalle las oscilaciones de estos gases de efecto invernadero en los últimos 800.000 mil años.

Aunque este concepto surgió asociado al efecto nocivo que tienen los gases de efecto invernadero con el uso generalizado que nuestra civilización realiza sobre los combustibles fósiles, ya desde mediados del siglo XIX se han ido acuñando diferentes términos que hacen referencia a las posibles consecuencias ambientales de la presencia humana en el planeta. Cabe resaltar que estos términos tienen cierta desconexión conceptual entre ellos, ya que consideran como puntos relevantes diferentes perspectivas disciplinarias, las que, aunque coinciden en considerar los procesos industriales como un foco importante que caracteriza al Antropoceno, difieren notoriamente en definir los comienzos de esta época, siendo motivo de controversia tanto fijar una fecha de comienzo, como si de verdad es posible hablar de una nueva época geológica. Algunos de estos términos tienen una perspectiva geológica y meteorológica, como son el Antropozoico, el Antropógeno, y el propio Antropoceno. Desde el ámbito periodístico se habla de Era Atómica, y desde la Economía se habla del Capitaloceno. Otros términos tienen una perspectiva más ingenieril, como el Tecnógeno (o Quinario), la Antropostroma, la Biosfera antropocena o la Tecnosfera física. Finalmente, otros términos aluden más bien a una perspectiva más filosófica, como el Psicozoico o Noosfera.

Dentro de las posturas disconformes con fijar los inicios del Antropoceno en la Revolución Industrial, destaca la hipótesis de William Ruddiman, conocida como "Antropoceno Temprano", que sitúa sus comienzos en los 8.000 años AP, con las intensas emisiones de los gases de efecto invernadero CO₂ y CH₄ ocasionadas como subproducto de las actividades agrícolas y ganaderas de la Revolución Neolítica. La gran expansión que sufrió la agricultura en Eurasia en este período significó a su vez en la deforestación de una gran parte de la masa boscosa que estaba en dicho territorio, liberando por combustión de la materia orgánica una cantidad importante de CO₂, que retrasó el desarrollo de una nueva glaciación predicha por los ciclos de Milanković.

Finalmente, el Antropoceno como concepto ha generado una acalorada discusión en la comunidad científica, ya que algunos consideran que es bastante atrevido considerar que nuestra influencia como especie dejará una huella perdurable en las rocas terrestres, así como otros que consideran que es más bien una decisión política que científica el surgimiento del concepto del Antropoceno. Todo lo anterior ha tenido un fuerte impacto en la cultura popular del mundo, desde una intervención artística sobre el hielo marino del Ártico, hasta películas y canciones que buscan hacer reflexionar sobre las acciones de nuestra especie sobre el medioambiente.

Palabras Clave: Antropoceno, Antropoceno temprano, Plastiglomerado, Plastisfera, Medioambiente.

Financiamiento: Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Referencias:

- Acuña, C. (2019). Dinámica de colonización microbiana en la formación de la Plastisfera, una visión funcional. Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/19128>.
- Brannen, P. (2019).. The Anthropocene is a joke. The Atlantic. (Agosto 13, 2019) <https://www.theatlantic.com/science/archive/2019/08/arrogance-anthropocene/595795/>.
- Corcoran, P. L., Moore, C. J., & Jazvac, K. (2014). An anthropogenic marker horizon in the future rock record. GSA Today, 24(6), 4-8. <https://doi.org/10.1130/GSAT-G198A.1>.
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. Nature, 415(6867), 23-23. <https://doi.org/10.1038/415023a>.
- Ruddiman, W. F. (2003). The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. Climatic Change, 61(3), 261-293. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f4>.
- Ruddiman, W. F. (2014). Earth's Climate. Past and Future (3rd ed.). W. H. Freeman and Company.
- Ruiz-Rubio, F. (1994). Cine y enseñanza. El cine de ficción es un útil material didáctico por su variedad temática y por su capacidad para presentar variedad temática y por su capacidad para presentar conflictos. Comunicar, 2(3), 74-80. <https://doi.org/10.3916/CQ3-1994-10>.
- Rull del Castillo, V. (2018). El Antropoceno. En Colección ¿Qué sabemos de? Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Editorial Los Libros de la Catarata. <https://www.digitallipublishing-com.uchile.idm.oclc.org/a/56604>.

Descubrimiento del litio en el Salar de Atacama en 1969

José Cabello Lechuga¹

(1) Centro de Estudios de Minerales Estratégicos y Críticos de Chile-CEMEC

En mayo de 1969, la oficina en Antofagasta del Instituto de Investigaciones Geológicas - IIG (hoy Sernageomin) inició un estudio del Salar de Atacama, con un área de 3.000 km². Fue hecho a solicitud del ministro de Minería de ese entonces. Buscaba conocer la existencia de minerales útiles en el salar.

Este estudio científico identificó un acuífero bajo la superficie del salar con salmueras de composición tipo clorurado, con altas concentraciones de Sodio, Magnesio, Potasio y Litio.

En la parte central del salar, denominada núcleo (área de unos 400 km²), se descubrió una importante concentración de **Litio, Potasio, Magnesio, Rubidio y Cesio**, en muestras de salmueras obtenidas mediante 2 sondajes.

Con esa información inicial estimó recursos inferidos por 40.000 toneladas de litio y 400.000 toneladas de potasio por metro vertical del yacimiento, considerando que se trataba de un depósito de gran interés económico. Ese recurso inferido por metro vertical estimado en ese estudio llevado a precios promedios actuales de Li y K representa un **valor *in situ* de más de US\$ 1.000 millones**. Todos los trabajos posteriores confirmaron ampliamente esa evaluación inicial con información parcial disponible. Hasta hoy el Salar de Atacama -a partir de dos operaciones- registra una **producción de unas 250.000 toneladas de litio con un valor actualizado de US\$ 3.000 Millones**.

Reservas reportadas para este importante depósito en el año 2021 alcanzan a unas 10.400.000 toneladas, que implican un valor *in situ* aproximado de US\$ 120.000 millones.

Con gran claridad del impacto económico que implicó este descubrimiento, es justo mencionar que los profesionales funcionarios del IIG que participaron fueron **Aldo Moraga B., Guillermo Chong D., Angélica Fortt Z. y Hugo Henríquez A.**, todos geólogos formados en la Escuela de Geología de la Universidad de Chile. Como en cualquier trabajo de exploración geológica fueron secundados por secretarías, dibujantes, ayudantes de campo y choferes.

También apoyaron la gestión de los funcionarios del IIG Juan Montoya y Juan Verdejo, del entonces Servicio de Minas del Estado; Hugo Alonso, químico de la Universidad del Norte; y el profesor Darío Lara, de la Escuela Pública de Peine, con su profundo conocimiento de la zona y su gente, quien incluso facilitó su casa para este histórico esfuerzo.

Ahora que se promoverá el desarrollo de una nueva industria nacional de este recurso estratégico, con protagonismo de comunidades y agregando valor a la producción al proponer tener Empresa Nacional del Litio y la creación del "Instituto Tecnológico y de Investigación Público del Litio y Salares" en Antofagasta, originando la investigación e innovación y con protagonismo del Estado en su avance y resultados, es justo reconocer ampliamente la gestión de profesionales, funcionarios y comunidad que hace más de 50 años iniciaba su labor en el Norte de Chile.

Palabras clave: Litio, Salar de Atacama, Geólogos.

Origen de los mitos entorno al terremoto de Atacama de 1922

Miguel Cáceres Munizaga¹

(1) Particular, Copiapó, Chile

Resumen

El terremoto del 10 de noviembre de 1922 es hasta la fecha el más destructivo y mortífero de los sucedidos en tiempos históricos en la región de Atacama. A pesar de que ha transcurrido un siglo desde que ocurrió y de que una serie de publicaciones científicas han revisitado sus parámetros técnicos, la sociedad mantiene varios mitos entorno de este, tales como que habría alcanzado una magnitud 10, que su epicentro habría sido en zona cordillerana o una supuesta predicción que un religioso habría realizado, entre otras. Investigaciones recientes han abordado estas temáticas y han traído luces al respecto, sin embargo, esto ha permeado lentamente a las personas, evidenciando uno de los mayores desafíos que los geocientistas tienen, sociabilizar los conocimientos de manera de que la comunidad entienda el medio físico en el cual están insertos, sean más conscientes de los riesgos inherentes relacionados al paisaje y, puedan prepararse de mejor manera para enfrentar un futuro fenómeno geológico con consecuencias catastróficas.

Introducción

El terremoto ocurrido el 10 de noviembre de 1922 en Atacama, no sólo es conocido por sus características destructivas, sino también porque localmente lo rodean mitos respecto de su magnitud, duración y ubicación del epicentro (entre otros) que salen a relucir cada vez que se conmemora un nuevo aniversario. Las investigaciones científicas en las últimas décadas respecto de este evento han traído nuevas luces en relación de sus parámetros sísmicos, sin embargo, aquella información no ha permeado hacia la comunidad, la cual sigue manteniendo un relato derechamente erróneo, transmitiéndose entre generaciones, haciendo perdurar el error.

La siguiente comunicación aborda los principales mitos referentes al terremoto de 1922, indagando en el origen de cada uno desde un punto de vista geológico-histórico.

El terremoto de 1922

El terremoto sucedió a las 23:50, siendo el más intenso y de mayor magnitud registrado en tiempos históricos en la Región de Atacama (rivalizando con el de 1819). Las investigaciones realizadas por diferentes autores indican magnitudes que varían entre 8.3 a 8.7, no obstante, las más modernas indican 8.6 y una profundidad de 35 km. El sismo, fue el segundo de mayor magnitud de los ocurridos en Chile en el transcurso del siglo XX (superado solo por el de Valdivia de 1960) y uno de los más grandes a escala planetaria durante el mismo periodo. Este movimiento telúrico provocó la destrucción casi completa de Vallenar y de gran parte de Copiapó, dejando más de 2000 damnificados y cobrando la vida de cerca de 700 personas (Cáceres, 2022). Además, fue seguido por un tsunami importante que se registró desde el sur de Perú hasta el sur de Chile, no obstante, fueron los puertos de Chañaral y Coquimbo los más dañados. Las olas se propagaron por el Océano Pacífico, alcanzando Hawái, Japón y Australia en donde provocaron algunos destrozos.

El epicentro “tierra adentro”

El terremoto ocurrió en una época en donde la sismología se encontraba en etapas tempranas de su desarrollo instrumental, pese a aquello, Chile ya contaba con una red sismológica instalada desde 1908 en diferentes ciudades, entre ellas Copiapó, donde existía una estación de segundo orden, sin embargo, el antiguo sismógrafo Wiechert de cerca de 200 kg se volcó producto de las sacudidas, mientras que en la de Santiago, las agujas rompieron los papeles al no contar con amortiguadores, problema similar al reportado en el observatorio de Buenos Aires (Cáceres, 2022). Pese a aquello, las ondas sísmicas fueron registradas en múltiples estaciones en otras partes del mundo, lo que sirvió a Sieberg y Gutenberg (1924) y posteriormente Willis (1929), para calcular el epicentro, quienes lo ubicaron en la parte cordillerana de Vallenar. A medida que progresó el conocimiento sismológico, la posición levantó especial suspicacia entre los sismólogos nacionales por haber sido seguido por un tsunami destructivo luego de ocurrido el terremoto, por lo que su epicentro ha estado en tela de juicio. Si bien el trabajo de Beck *et al.* (1998) no incluyó la determinación geográfica del epicentro, ellos lo posicionaron gráficamente mucho más cerca de la costa, finalmente, no es hasta el trabajo de Di Giacomo (2018) (Catálogo ISC-GEM) en que se modifica su posición a 40 km al SE de Vallenar, mucho más cerca de la costa que la arrojada por cálculos anteriores.

Una lápida y la magnitud 10

La población atacameña, mantiene la creencia que el tamaño del terremoto fue mucho más grande que lo calculado por diferentes investigadores (p. ej. Abe, 1979; Carvajal *et al.*, 2017; Kanamori, *et al.*, 2019) y que habría alcanzado una magnitud de 10, dado que el sismógrafo al voltearse no habría alcanzado a registrar la parte más intensa del sismo. Esta afirmación proviene de la confusión que mantiene la comunidad entre magnitud e intensidad.

Luis Sierra Vera, profesor del Liceo de hombres de Copiapó y encargado de la estación sismológica instalada allí, describió detalladamente el terremoto: “A las 23h 53m 30s se inició un formidable ruido del 5 grado, semejante a un fuerte trueno que despertó a los que dormían y llenando de terror a todos. Inmediatamente precipitó un movimiento de tierra cuyas oscilaciones principales fueron de noreste a suroeste y algunas verticales menores alcanzando el V.o de intensidad que se mantuvo unos 30 segundos, aumentando la intensidad al VIII grado por unos 20 segundos y a continuación llegaron las oscilaciones del grado máximo que duraron tres minutos;

intensidad al VIII grado por unos 20 segundos y a continuación llegaron las oscilaciones del grado máximo que duraron tres minutos; después la intensidad disminuyó poco a poco hasta IV o II grado por varios minutos, para aumentar al VIII grado y disminuir, por fin, definitivamente. En total, el temblor duró o fue sensible al hombre unos once minutos". Cabe mencionar que la calificación de intensidad que el profesor Sierra utiliza está basada en la escala de Rossi-Forel, cuyo máximo valor es 10 y que el sismo alcanzó luego de un minuto de haber comenzado. Parte de lo descrito por Luis Sierra Vera quedó inmortalizado en una placa instalada en la fosa común de las víctimas del terremoto en el Cementerio General de Copiapó, en la que se lee: "(...) El inesperado terremoto alcanzó grado 10 y su duración fue cercano a los 11 minutos. (...)". A pesar de la poco transitada ubicación, esta información ha sido interiorizada y masificada por la comunidad en redes sociales e incluso el sitio es parte de un circuito turístico nocturno que en ocasiones se desarrolla, lo que en conjunto con la confusión entre magnitud e intensidad ha llevado a que la gente crea que el terremoto llegó a magnitud 10 y una extensa duración, lo cual en base al conocimiento científico no es correcto.



Placa instalada en la fosa del Cementerio General de Copiapó en donde se lee que el terremoto "alcanzó grado 10".

Religión, política y predicción

Pese a lo descrito en los párrafos anteriores, lo primero que viene a la mente de la comunidad atacameña cuando se recuerda de este evento telúrico, es la supuesta predicción que un sacerdote franciscano habría realizado cerca de una semana antes de que ocurriera. Sucedió que para la época el Partido Radical tenía una gran cantidad de adeptos (este tuvo su origen en Copiapó a mediados del siglo XIX), su carácter anticlerical generaba constantes roces entre la iglesia y los correligionarios tanto en persona, como en medios escritos. Cinco días antes de que el terremoto ocurriera, hubo una procesión en honor a la virgen por las calles de Copiapó, la cual fue liderada por el sacerdote Crisógono de la Sierra y Velázquez, conocido localmente como el Padre Negro, ocasión utilizada por los Radicales para mofarse de los feligreses durante la romería, la que tuvo incluso que cambiar de calle, lo que enfureció al párroco, el cual, durante la posterior misa, habría mencionado que algo terrible ocurriría en Copiapó y que la ciudad y sus habitantes sufrirían grandemente. Luego, el 7 de noviembre a las 18:00 ocurriría un fuerte sismo ($M_s=7$) que alarmó a la población, más no generó mayores problemas. Este fue usado por el diario El Atacameño para burlarse del religioso, mencionando: "En Copiapó tenemos el honor de albergar nada menos que un competente rival del ya famoso Nuño porteño. Nadie pensaría que bajo el bendito sayal del Padre Negro se ocultaba un sismólogo hecho y derecho. El caso, increíble, pero auténtico, es que hace ya no sé cuántos días, nuestro padre de marras había profetizado desde el púlpito de la capilla de la Candelaria, que Copiapó estaba destinado a hundirse en castigo de sus muchos pecados, pero más afortunado que Sodoma, Copiapó tiene más de un justo entre sus habitantes: los cuatro chinos promeseros que escoltan la Virgen de la Candelaria en sus andanzas primaverales. Gracias a ellos, el hundimiento se redujo a un temblorazo sin más consecuencias que el inevitable susto de sus herejes y masones. Y el Padre Negro ha acertado medio a medio."

Las revisiones realizadas por Renders (1982) y posteriormente por Cáceres (2022), exponen varios testimonios publicados en la prensa de la época, los que coinciden en que el cura efectivamente lanzó una amenaza durante la misa, no obstante, los mismos difieren en las palabras que habría utilizado e incluso en la secuencia de eventos, por lo que no hay claridad si dijo terremoto o similar para referirse a la catástrofe y más bien, la publicación mofándose luego del sismo del 7 de noviembre fue tomada por la prensa mapochina para ensalzar la figura del sacerdote con fines comerciales.

Reflexión

El terremoto más importante históricamente en la región de Atacama está rodeado de una nube de mitos que alimentan el imaginario local, trabajos de rescate y actualización de la literatura técnica a la fecha ha permitido aclarar varios elementos que se desprenden de este sismo, sin embargo, esto ha demorado en permear hacia la sociedad, demostrando una desconexión que persiste entre la geología y la comunidad. Lo descrito muestra uno de los principales desafíos que los geocientistas tienen en la actualidad, lograr masificar las Ciencias de la Tierra de manera de que las personas no sólo adquieran conocimiento enciclopédico, sino que logren

entender el medio físico con el que conviven, de forma de generar una sociedad mucho mejor preparada, en especial desde el punto de vista telúrico; aquello es crítico en Atacama, dado que es una de las zonas del país donde se espera que ocurra el próximo terremoto destructivo ya que la energía sísmica acumulada es suficiente como para gatillar un sismo similar al de 1922.

Palabras Clave: terremoto 1922, sísmica histórica, Atacama.

Referencias:

- Abe, K. 1979. Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research* 84(B4): 1562-1568.
- Beck, S. Barrientos, S., Kausel, E., Reyes, M. 1998. Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Science* 11(2): 115-129.
- Cáceres, M. 2022. El terremoto que destruyó Atacama. Ediciones On Demand, Santiago. 187 p.
- Carvajal, M., Cisternas, M., Gluber, A., Catalán, P., Winckler, P., Wesson, R. 2017. Reexamination of the magnitudes for the 1906 and 1922 Chilean earthquakes using Japanese tsunami amplitudes: implications for source depth constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122: 4-17.
- Di Giacomo, D., Engdahl, R., Storchak, D. 2018. Comment on "Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile" by Ruiz and Madariaga, 2018. *Tectonophysics* 745: 453-456.
- Kanamori, H., Rivera, L., Lingling, Y., Lay, T., Murotani, S., Kenshiro, T. 2019. New constraints on the 1922 Atacama, Chile, earthquake from historical seismograms. *Geophysical Journal International* 219: 645-661.
- RENDERS, P. 1982. Padre Negro: apóstol de Atacama. Santiago, Editorial Salesiana. 32 p.
- Sieberg, A. & Gutenberg, B. 1924. Das erdbeben in der chilenischen Provinz Atacama am 10. November 1922. *Veröffentlichungen der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena*. Jena, Verlag von Gustav Fischer. 56 p.
- Willis, B. 1929. Earthquake conditions in Chile. *Studies in Comparative Seismology* No. 382, Washington, Carnegie Institution of Washington. 178 p.

Mineralogistas notables del Chile decimonónico y sus nuevas especies minerales

Patricio Nicolás Cuadra Cárdenas¹

(1) Consultor independiente, Santiago, Chile

RESUMEN

Se presentan los mineralogistas más notables que trabajaron en Chile durante el siglo XIX, aportando al desarrollo y enseñanza de la química y de la mineralogía y al descubrimiento y descripción de nuevas especies minerales en el territorio nacional.

INTRODUCCIÓN

A partir de 1818, la necesidad de la naciente República de Chile por reconocer su territorio y sus riquezas minerales requirió la participación de especialistas provenientes de Europa para realizar esta magna empresa. En el ámbito minero, los empresarios enviaban muestras minerales de diferente naturaleza a químicos o mineralogistas del viejo mundo y recibían después de algún tiempo los resultados. Este proceso era engorroso y lento, por lo que no se conocían a cabalidad los yacimientos y más bien, se trabajaba sobre lo que iba quedando a la vista a medida que avanzaba la explotación. Se requería contar con ensayadores y mineralogistas radicados en el país y que pudieran formar nuevos técnicos en estas materias. En este contexto, llegaron a Chile, por diferentes vías, varios personajes que influirían en el desarrollo del conocimiento minero y geológico del país y que, de paso, aportarían con el descubrimiento de nuevas especies minerales.

El presente trabajo describe en forma resumida el aporte de los mineralogistas más destacados que trabajaron en Chile en el siglo XIX en el descubrimiento de nuevas especies minerales en el territorio de nuestro país, cuya referencia base es el libro "Especies Minerales Chilenas" (Cuadra, 2023). Todas estas nuevas especies fueron mencionadas en diversas publicaciones a nivel internacional, aunque algunas de ellas fueron posteriormente desacreditadas por diversas razones. Las especies aceptadas actualmente han sido validadas por la *International Mineralogical Association (IMA)*.

Ignacio Domeyko Ancuta (1802-1889)

Nació el 31 de julio de 1802 en la localidad de Niedźwiadka Wielka, en ese entonces territorio polaco-lituano que a fines del siglo había pasado a dominio del Imperio Ruso, formando parte actualmente del estado independiente de Bielorusia. Estudió en la Universidad de Vilnius, capital de Lituania, donde se recibió de Magíster en Matemáticas en 1822, culminando su formación en 1837 en la Escuela de Minas de París, todo lo cual le permitió desarrollar sólidos conocimientos, principalmente en química y mineralogía. Esto último le valió ser contactado en París por el ingeniero y empresario francés Charles Lambert, quien le transmitió, por encargo del gobierno de Chile, el interés por contar con sus servicios para iniciar la enseñanza de estas materias en la región minera de Coquimbo.

Desde su llegada a Chile en 1838 hasta pocos días antes de su fallecimiento, este químico, mineralogista y naturalista polaco desarrolló una labor incesante, aportando no sólo al desarrollo de la mineralogía y geología de Chile y repúblicas vecinas, sino también al fortalecimiento de la enseñanza científica y técnica en el país, desde sus clases de química, mineralogía, geología y minería impartidas en el liceo de Coquimbo, en la ciudad de La Serena, pasando por su estadía como profesor en el Instituto Nacional en Santiago a partir de 1846 y, finalmente, ocupando el cargo de Rector de la Universidad de Chile entre 1867 y 1883.

En sus tratados de mineralogía, publicados en 1845, 1860 y 1875, y los varios apéndices de éstos, publicados entre 1867 y 1884, describe numerosos minerales de Chile y repúblicas vecinas, nombrando algunos como nuevas especies descubiertas en territorio chileno. Estas últimas incluyen las especies minerales nantoquita, toconalita y kröhnkita, aceptadas en la actualidad como válidas, así como las especies ammiolita, arquerita, chañarcillita, chileita, chilenia, chilenita, huascolita, llanca, nitroglauberita, philippita, rosilla y taltalita, las cuales, sin embargo, han sido desacreditadas posteriormente. Además, tuvo un importante rol en el descubrimiento de la schwartzembergita y de la propia domeykita, ésta última encontrada en el cerro Calabazo, Illapel, y descrita por Domeyko en su Mineralogía (1845) bajo la denominación de "cobre blanco", en base a lo cual el mineralogista austríaco Wilhelm Haidinger la incluye en su manual de mineralogía, publicado el mismo año, nombrándola en honor a su descubridor.

Frederick Field (1826-1885)

Este químico inglés trabajó en Chile entre 1848 y 1859 en las fundiciones de Coquimbo, Caldera y Guayacán, al mismo tiempo que realizó varios reconocimientos de minas de la región de Coquimbo, algunos de los cuales fueron incluidos entre 1850 y 1851 en los Anales de la Universidad de Chile.

En 1857, describió la algodonita descubierta en la mina de plata Los Algodones, Coquimbo, la guayacanita en una remesa de mineral ingresada a la fundición de Guayacán, la alisonita, como un nuevo sulfuro de cobre y plomo, encontrado en la Mina Grande, cerca de Coquimbo, además de la cuproplumbita. Actualmente, sólo la algodonita se considera una especie válida.

Hans (Juan) Oscar Schulze (1853 – 1892)

Nació en Waldheim, Sajonia. Estudió ciencias naturales en la Universidad de Leipzig durante tres semestres, adquiriendo sus primeros conocimientos experimentales de química, siguiendo luego sus estudios en la *Bergakademie* de Freiberg, en Sajonia, recibiendo su título de ingeniero en minería en 1875 y obteniendo en 1880 su doctorado en la Universidad de Leipzig. Poco tiempo después fue nombrado profesor en Freiberg. En 1884 fue contratado por la Universidad de Chile para hacerse cargo de la cátedra de Química y

Docimasia, sucediendo a Ignacio Domeyko, quien se había retirado. Con gran entusiasmo, pero con recursos modestos, logró montar un laboratorio para desarrollar su labor científica y de docencia, logrando en pocos años levantar la enseñanza de la química a un alto nivel.

Siguiendo su pasión, no solo se dedicó a la química general, sino que también trabajó en el campo de la geología y la mineralogía. Es así, que realizó numerosas investigaciones en laboratorio y en terreno, fruto de las cuales describió tres nuevos minerales provenientes de la provincia de Tarapacá, nombrándolos como tamarugita, en 1889, cuproyodargirita y argento-percilita, estos dos últimos en 1892. Lamentablemente, su carrera se vio interrumpida a la temprana edad de 39 años, a causa de una intoxicación con hidrógeno arseniado, producto de una reacción química accidental ocurrida mientras trabajaba en su laboratorio el día 24 de noviembre de 1892. En 1895, Martens, químico farmacéutico chileno nombra un mineral de cobalto descubierto en una de las muestras de este profesor, como schulzenita. De estos cuatro minerales, sólo la tamarugita es considerada actualmente como una especie válida.

Andreas Theodor (Teodoro) Hohmann (1843 – 1897)

Ingeniero de minas natural de Hessen, Alemania, emigró a Chile en 1862 y participó activamente en la minería y en el estudio de la mineralogía del país. Entre 1891 y 1897 publicó en el Boletín de la Sociedad Nacional de Minería una serie de diez artículos bajo el título de "*Mineralogía Americana*", en los que reportaba los resultados de análisis químicos y mineralógicos realizados en muestras de diferentes distritos mineros, tanto de Chile, como de países vecinos. Mantuvo una comunicación permanente con diferentes mineralogistas europeos, a los que enviaba muestras para su estudio. En su tiempo, fue famosa su colección de minerales de Chile, recogidos en sus largos años de estadía en éste, la cual incluso fue valorada internacionalmente.

Entre las muestras enviadas a mineralogistas europeos por Hohmann, se definieron nuevos minerales tales como la amarantita y la hohmannita, por Frenzel en 1888, la salvadorita, por Herz en 1896 y la arzrunita, por Arzruni y Thaddée en 1899. De estos cuatro minerales, sólo la salvadorita ha sido desacreditada, manteniéndose como válidas las otras tres. Obviamente, la hohmannita fue nombrada en honor a este ingeniero apasionado por la mineralogía, aunque en todas las fuentes de consulta mineralógica disponibles se refieren erróneamente a Thomas Hohmann.

Ludwig Darapsky Gerlach (1857 – 1916)

Existe poca información y, en parte, contradictoria sobre la vida de Darapsky, por lo que la descripción incluida en esta parte ha sido extractada en forma libre de los capítulos introductorios de las reediciones efectuadas por la Cámara Chilena de la Construcción, de sus obras más importantes, "*Las aguas minerales de Chile*" (2011) y "*El Departamento de Taltal*" (2013), respectivamente. Nació en Maguncia, capital de Renania-Palatinado, Alemania. A los 19 años se trasladó al estado de Baviera, recién incorporado al imperio alemán, para estudiar Ciencias Naturales en la Universidad de Erlangen, donde desarrolló una fuerte pasión por la botánica, la química y la geología, completando su formación en las universidades de Leipzig y Estrasburgo, graduándose finalmente de doctor en Filosofía a los 23 años. En 1881 viajó a nuestro país para desempeñarse como profesor de Química de la Universidad de Chile.

Realizó descripciones detalladas de los yacimientos de plata de Cachinal de la Sierra, Esmeralda, Sierra Overa y Guanaco y sus métodos de explotación. En 1888 fue contratado como administrador en el primero de éstos, asumiendo seis años después el cargo de gerente, estableciéndose por cerca de diez años en la ciudad de Taltal, donde la compañía tenía sus oficinas y una fundición de metales. En ese período exploró en detalle el desierto y la puna de Atacama, realizando mediciones geográficas y tomando notas y muestras sobre la geología y la flora de la región, lo que le permitió confeccionar el mapa más completo del desierto y una caracterización detallada del departamento de Taltal, publicada en Berlín en 1900, de regreso a su país.

En mineralogía se destacan varias publicaciones realizadas en revistas alemanas y también en artículos del Boletín de la Sociedad Nacional de Minería en Chile. Describió los nuevos minerales aromita, castanita, paposita, planoferrita y rubrita, los cuales fueron descartados años después. El mineral darapskita, un sulfato-nitrato de sodio encontrado en Pampa del Toro, Antofagasta, fue nombrado en su honor por August Dietze en 1891.

August Konrad Dietze (1866 - 1894)

Químico alemán, instalado en Taltal, que le dio impulso a la industria del yodo en esta área en la Lautaro Nitrate Company, llegando a superar a la región de Tarapacá. Dietze fue el descubridor de la primera especie mineral del grupo de los yodatos, un yodato de calcio al cual le dio el nombre de lautarita. Además, describió una sal doble de nitrato de sodio y sulfato de sodio, nombrada como darapskita en honor a su amigo y colega el Dr. Ludwig Darapsky, y una sal doble de cal yodada y cromada, que denomina "*jodchromate*" (cromato de yodo).

Tres años después, luego de estudiar el cromato de yodo descrito por Dietze, en 1894 el mineralogista alemán A. Ossan lo denomina dietzeita, indicando lo siguiente: "Me gustaría llamar dietzeita este nuevo mineral, primer representante de una sal doble de yodo y ácido crómico, en honor a su descubridor, el Dr. A. Dietze, quien murió en una tormenta de nieve el año pasado durante una expedición científica en los Andes".

Le correspondió a Ludwig Darapsky escribir un obituario dedicado a él, que fue leído en las reuniones de la Sociedad Científica Alemana en Santiago, donde destacó la contribución científica de su compatriota.

CONCLUSIÓN

Con la llegada de Ignacio Domeyko a Chile en 1838, se inició el estudio de los minerales en el territorio del país, principalmente en las regiones mineras de Atacama y Coquimbo y, paralelamente, la enseñanza de materias necesarias para la actividad minera. En esta

labor, le siguieron otros químicos, mineralogistas e ingenieros de minas provenientes de Europa, todos los cuales aportaron sus conocimientos para realizar observaciones y análisis cuantitativos de los minerales y apoyar la enseñanza de la química y de la mineralogía en Chile.

Hasta finales del siglo XIX se habían definido 32 nuevas especies minerales descubiertas en Chile, reconocidas como válidas por la IMA, de las cuales las siguientes 13 lo fueron como fruto de los estudios de los mineralogistas mencionados en este trabajo: nantoquita, toconalita, kröhnkita, schwartzembergita, domeykita, algodónita, tamarugita, amarantita, hohmannita, arzunita, lautarita, darapskita y dietzeita, destacándose en negrita las nombradas en honor a 4 de ellos (Tabla 1).

Nombre mineral	Fórmula	Localidad Tipo	Referencia original	Status IMA	N° Localidades	
					Chile	Otros países
Domeykita	Cu_3As	Cerro Calabazo, Coquimbo	Haidinger, 1845	G-1845	7	> 50
Schwartzembergita	$\text{Pb}^{2+}_5\text{H}_2\text{I}^{3+}_2\text{O}_6\text{Cl}_3$	Mina ubicada a diez leguas al norte de Paposo, Antofagasta	Dana, 1868	G-1868	22	1
Nantoquita	CuCl	Mina Carmen Bajo, cerro Las Pintadas, Nantoco, Atacama	Domeyko, 1867	G-1867	1	41
Tocomalita	$(\text{Ag}, \text{Hg})\text{I} (?)$	Mina Delirio, Chañarcillo, Atacama	Domeyko, 1867	G-1867	1	3
Kröhnkita	$\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mina Chuquicamata, Antofagasta	Domeyko, 1879	G-1879	13	23
Algodónita	$\text{Cu}_{1-x}\text{As}_x (X=0,15)$	Mina Los Algodones, Coquimbo	Field, 1857	G-1857	45	2
Tamarugita	$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cerro Pintados, Pampa del Tamarugal, Tarapacá	Schulze, 1889	G-1889	12	> 50
Amarantita	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Algunas leguas al norte de Sierra Gorda, Antofagasta	Frenzel, 1888	G-1888	10	19
Hohmannita	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}(\text{SO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Algunas leguas al norte de Sierra Gorda, Antofagasta	Frenzel, 1888	G-1888	4	9
Arzunita	$\text{Pb}_2\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_4\text{Cl}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mina Buena Esperanza, Challacollo, Tarapacá	Arzruni & Thaddeeff, 1899	Q-1899	1	1
Lautarita	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$	Pampa del Pique III, Oficina Lautaro, Antofagasta	Dietze, 1891	G-1891	3	0
Darapskita	$\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$	Pampa del Toro, Oficina Lautaro, Antofagasta	Dietze, 1891	Rd-1967 s.p	31	17
Dietzeita	$\text{Ca}_2(\text{IO}_3)_2(\text{CrO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$	Oficina Lautaro, Antofagasta	Ossan, 1894	G-1894	6	0

Tabla 1. Especies minerales validadas mencionadas en el presente trabajo.

Se suman a lo anterior las especies ammiolita, arquerita, chañarcillita, chileita, chilena, chilénita, huascolita, llanca, nitroglauberita, philippita, rosilla, taltalita, guayacanita, alisonita, cuproplumbita, cuproyodargirita, argento-percilita, schulzenita, salvadorita, aromita, castanita, paposita, planoferrita y rubrita, las que posteriormente resultaron desacreditadas, pero que, en conjunto con las anteriores son una demostración de los esfuerzos dedicados por los mineralogistas que trabajaron en nuestro país por el desarrollo del conocimiento geológico y minero del territorio.

Palabras Clave: Chile, mineralogistas, Siglo XIX, nuevas especies minerales.

Referencias:

- Cuadra C., Patricio (2023) Especies Minerales Chilenas. Una contribución al patrimonio geológico y minero de Chile. RIL Editores., 192 p.

Breve historia de la comprensión del paisaje de la Patagonia Meridional y Tierra del Fuego

Álvaro Pérez Pérez¹, Danilo González Faletto¹

(1) Empresa Nacional del Petróleo, Depto. de Estudios de Exploración, José Nogueira 1101, Punta Arenas, Chile

Revisar la historia de cómo la humanidad ha percibido el paisaje de una región, ofrece, a quienes estudian su geología, la oportunidad para reflexionar sobre la responsabilidad que implica aportar ideas al imaginario de quienes lo habitan, teniendo en cuenta que este conjunto de concepciones determina, y determinará en gran medida, las relaciones que un pueblo tendrá con su entorno físico.

Como dijo Rosenberg (2009), la geología es la “ciencia del paisaje”. Esta definición metafórica nos permite conectar esta disciplina con las ideas precientíficas sobre lo que hoy llamamos paisaje, rocas, corteza, etc. Anteriormente, lo hizo Vitaliano (1973) al estudiar la relación entre el mito y el paisaje, inaugurando la geomitología.

En Magallanes, las primeras explicaciones del entorno natural de la región las encontramos en las cosmogonías de los pueblos aborígenes que habitaron estas tierras desde hace aproximadamente 8000 años. Un ejemplo destacado es el geomito “De cómo Táiyin vino en ayuda de la gente” descrito en los trabajos de principios del siglo pasado por el antropólogo Martin Gusinde (1982), que nos relata la historia del héroe Táiyin quién ultimó a la malvada y egoísta Táita, una mujer de mucha influencia y poder entre los Selk’nam, quien había prohibido al pueblo beber desde los estanques bajo su dominio, en momentos en que la gente carecía de este recurso. El selk’nam Antonio Toin relató en 1923:

“Luego Táiyin, tomó piedras. Con su honda las arrojó en todas direcciones. Allí donde estas piedras caían, se producía una rajadura que se llenaba inmediatamente de agua...¡arrojaba las piedras hacia dónde le venía en gana! Hacia el norte arrojó un gran bloque de piedra: de inmediato se formó una larga rajadura y la Isla Grande quedó separada de la tierra existente detrás (Estrecho de Magallanes). Después arrojó una piedra hacia el sur y en seguida se formó el canal ancho (Canal Beagle). Cuando arrojó otra piedra hacia el este, se separaron las islas de allí (Isla de los Estados)”. Y las piedras que arrojaba hacia el oeste también separaban muchas islas. Sea cual fuera el lugar hacia el que Táiyin arrojaba una piedra, allí se desprendía un pedazo de tierra.” (Gusinde, 1982).

Al igual que nuestra concepción moderna, la mitología Selk’nam consideraba que el continente y Tierra del Fuego estuvieron unidos en el pasado y que un agente modelador (Táiyin para los Selk’nam y las glaciaciones del Pleistoceno para la ciencia actual) surcó los canales, configurando el Archipiélago Fueguino.

Las creencias Selk’nam acerca del paisaje convivieron por largo tiempo con el imaginario occidental de la *terraaustralis* que comenzó a desarrollarse incluso antes del descubrimiento del Estrecho de Magallanes en 1520. Sin embargo, para el europeo de aquellos años “el paisaje era un trasfondo subordinado a las narraciones religiosas o históricas” (Rosenberg, 2009). Hasta comienzos del siglo XVII la región poseía la imagen de un territorio donde se acaba la tierra, con un clima hostil, de dificultoso acceso y que concentraba numerosas tragedias (Urbina, 2018).

Según Rosenberg (2009), fue necesario concebir una idea de paisaje para que existiera la geología y esto ocurrió gracias a la conceptualización del paisaje como un objeto geométrico a finales del siglo XVI y principios del XVII cuando la palabra “paisaje” entró en la lengua vernácula en el norte de Europa. Finalmente agrega que “el redescubrimiento de la geometría griega y árabe revolucionó todos los aspectos de la cultura occidental al comprender las relaciones espaciales y la estructura geométrica de la naturaleza. La geometría transformó la contabilidad, la navegación, la cartografía, la forma de hacer la guerra y de comprender el paisaje, principalmente, a través del nacimiento de la perspectiva visual”.

Por ejemplo, si contrastamos la ilustración de las islas Marianas (Figura 1a), publicada por Pigafetta en 1533, con la de la bahía *Christmas Sound* (Figura 1b), realizada por el pintor Williams Hodges en 1777 durante el segundo viaje de James Cook, podemos apreciar que: en la primera se representa el paisaje como una “vista” que acumula características individuales, no incorporadas en un todo y volcadas en un solo plano, carente de perspectiva; mientras que, el segundo dibujo es una composición ordenada, un conjunto de partes integradas en un todo, dentro de un espacio con volumen medible, largo, ancho y profundidad. Ambas ilustraciones evidencian el cambio sustancial en la percepción del entorno físico que sufrió la cultura occidental durante el Renacimiento y que, a la vez, transformó la forma de comprender la Patagonia y Tierra del Fuego.

Las primeras descripciones occidentales del paisaje de la región eran breves y anodinas. Las diversas exploraciones ocurridas desde el siglo XVI hasta el siglo XVIII se enfocaron en dimensionar los aspectos más necesarios para la navegación: derroteros, profundidad del mar, vientos dominantes, escollos, el clima, etc. Sin reflexionar demasiado en el paisaje.

Posteriormente, las primeras observaciones científicas -realizadas comúnmente por el naturalista a bordo del navío- abrieron otra dimensión: la composición del paisaje a través de la descripción sistematizada de la petrología y mineralogía de las masas rocosas. La mineralogía se enseñaba generalmente a quienes estudiaban medicina y muchos de ellos terminaron en expediciones como médicos y naturalistas. Los viajes de John Narborough (1670-1671), Bougainville (1767) y Cook (1774) realizaron descripciones puntuales, principalmente petrológicas y geomorfológicas. En ocasiones se reportaba un evento extraordinario, como el presenciado en 1820 por la tripulación del *M.S.H Convoy*. Su capitán, Basil Hall, hijo del fundador de la geología experimental, describió lo que parecía un incendio en la parte sur del Archipiélago de Tierra del Fuego y que interpretó como la expulsión de roca volcánica incandescente. Este es el registro más reciente de erupción del volcán Fueguino, el más austral de los Andes.

A principios del siglo XIX Inglaterra poseía dominios en África, Asia, Oceanía y el Caribe. Contar con información cartográfica detallada de rutas comerciales alternativas hacia las colonias fue razón suficiente para embarcarse en la titánica empresa de

cartografiar las tierras australes de las nuevas repúblicas independientes que reclamaban el Conosur de América. En 1826 el Almirantazgo británico envió dos naves a la región con objetivo de hacer levantamientos hidrográficos, su líder fue el oficial de la Marina Real Británica, hidrógrafo y miembro de la Royal Society, Phillip Parker King. Las cartas construidas lograron entregar otra perspectiva del paisaje de la Patagonia meridional y de Tierra del Fuego, revelando su carácter trinitario de mar, montaña y planicie. Un paisaje rasgado por canales estrechos y de bordes particularmente rectos que se extienden por decenas a cientos de kilómetros mostrando el carácter más dramático de la geología americana en los mapas actuales.



Figura 1: A) representación de las islas Marianas (Pigafetta, 1533). **B)** Bahía Christmas Sound (explicación en el texto).

En aquellos años, la geología comenzaba a consolidarse como una ciencia de campos de estudios claramente delimitados. En 1807 se había fundado la Sociedad Geológica de Londres y en 1815 William Smith realiza el primer mapa geológico de Gran Bretaña popularizando esta metodología como una poderosa herramienta a la hora de disponer tridimensionalmente las masas de rocas y los recursos minerales. Su uso tuvo una rápida expansión, en gran parte por condensar múltiples aspectos del paisaje sobre un plano, pero también porque potenció el conocimiento geológico como un instrumento de la expansión colonial (Rogers et al, 2022 y referencias ahí incluidas). "Los millones de kilómetros cuadrados coloreados según el sistema británico representaban nuevas provincias anexadas por la geología de aquel imperio" (Stafford, 1984).

Bajo estas nuevas formas de comprender el paisaje en diciembre de 1831 zarpa desde Inglaterra una segunda campaña hidrográfica compuesta por un solo barco, la HMS Beagle, a cargo de Robert Fitz Roy. En ella viajaba el primer geólogo moderno que trabajó en estas tierras, Charles Darwin. El año anterior al zarpe del Beagle, Charles Lyell había publicado un libro canónico para esta ciencia, "Principles of geology" el cual acompañó a Darwin en su paso por las tierras magallánicas. Esta obra disputaba el marco teórico dentro del cual se integraban las observaciones. Darwin fue un geólogo moderno, en cuanto sus formas de interpretar la geología son en gran medida las que hoy se reconocen como válidas. Para Hutton, luego para Lyell y Darwin, el calor del interior de la Tierra juega un papel fundamental en los ciclos de levantamiento de masas líticas, erosión, sedimentación y conformación de nuevas rocas. Así como el magma conformará rocas cristalinas que hasta hoy llamamos ígneas o plutónicas. Adicionalmente para estos geólogos, la mayoría de los mecanismos que van conformando el paisaje son procesos que actúan lentamente en el tiempo, de manera a veces imperceptibles, pero constantes.

Bajo este paradigma, Darwin tuvo la oportunidad de construir para occidente una idea más compleja del paisaje de la región de Magallanes. Las tareas hidrográficas le dieron la oportunidad de recorrer gran parte de la región y disponer de una base cartográfica detallada en donde representar la geología. Al igual que las expediciones que lo antecedieron y otras tantas que lo sucedieron, Darwin comenzó describiendo la composición del paisaje, pero dio especial importancia a un aspecto novedoso para ese tiempo: la edad de las rocas, introduciendo el tiempo como nueva dimensión del paisaje magallánico. Este trabajo lo hizo por medio del estudio detallado de los fósiles recolectados en el viaje, construyendo una sucesión estratigráfica ordenada en edades nominales, las cuales desplegó en el primer mapa geológico de la Región, dotando al paisaje de una historia geológica explicada por procesos que se suscitaron en el tiempo. Procesos que transformaron múltiples paisajes del pasado, o paleo-paisajes, hasta configurar el que hoy habitamos.

Durante casi un siglo, la comprensión geológica de la región quedó, en general, limitada por las dimensiones exploradas por Darwin. Expediciones científicas como la francesa de Dumont d'Urville con el trabajo de Grange de 1838, la estadounidense liderada por Wilkes y el volumen de Dana de 1839, la italo-argentina de 1887 liderada por Bove y Lovisato, el viaje de la Romanche y su naturalista Hyades de 1887 aportaron datos puntuales de la composición de las masas rocas que constituyen el paisaje de la región. Si bien el mapa realizado por Darwin es incompleto y nunca fue publicado (Zappettini y Mendía, 2009), se puede considerar como precursor en el empleo de este formato capaz de condensar todas las dimensiones del paisaje que Darwin había reconocido en Magallanes y cuyo uso se retomó recién a comienzos del siglo XX cuando las exploraciones, principalmente petrográficas, de geólogos como Quensel en 1910 y Krank en 1932 acompañaron sus publicaciones con mapas poblados de escasos datos, pero que en general marcaban muy bien los principales rasgos geológicos del lugar.

Paralelo a ello, a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX, la población Selk'nam fue perseguida y desplazada hasta desaparecer por completo. La disputa por ocupar el paisaje resultó en un etnocidio despiadado que manchará para siempre la historia de la Región. Las formas de interpretar el paisaje magallánico fueron, como en muchas partes del mundo, cercenadas a sólo una visión, la occidental.

Es también a comienzos del siglo XX cuando se intensifican, en Magallanes, los esfuerzos para encontrar petróleo. En la región ya se explotaba desde hace algunas décadas el carbón de la Formación Loreto, recurso conocido desde 1548 por reportes de Pedro Sarmiento de Gamboa. Sin embargo, los primeros informes de emanaciones de hidrocarburos en el territorio vinieron de los franceses, Rousson y Willems en 1891. En menos de 10 años, los lugareños comenzaron a reportarlas en varios puntos de la región y el tema comenzó a llenar espacios en los medios de comunicación local, motivando la organización de vecinos de la ciudad quienes aunaron capital para embarcarse en la "exploración de hidrocarburos" logrando concretar la excavación de algunos pozos muy someros en las cercanías de la ciudad de Punta Arenas. Los laboreos carboníferos en el Río de las Minas e Isla Riesco junto a las excavaciones petroleras, revelaron otra dimensión del paisaje de la región: su constitución en profundidad.

Las noticias de los indicios de hidrocarburos en Magallanes llegaron rápidamente a las autoridades de la Nación. El interés del Estado terminó imponiéndose al de los privados y en 1932 se decretó la exclusiva pertenencia al Estado de todos los recursos hidrocarburíferos que se descubrieran en el país. Así fue que en la década del 30 se realizaron los primeros sondeos financiados por el Estado a través del Departamento de Minas y Petróleos. Estos fueron acompañados de estudios en superficie llevados por diversas comisiones como las de Felsh (1913), Bonarelli (1917), Decat y Poymerol (1931) y Keidel y Hemmer (1931), las cuales además contribuyeron a completar el conocimiento de la geología de la región en lugares más apartados de la costa. Los datos puntuales aportados por cada pozo dieron paso a una visión bidimensional (perfil geológico) conseguida a través de la correlación de la estratigrafía descrita e incluso se generaron mapas del subsuelo realizados con escasos datos. Esta visión de subsuelo mejoró con los trabajos realizados por la United Geophysical Company contratada en Estados Unidos por la CORFO y que concluyó con el descubrimiento de acumulaciones comerciales de petróleo en Tierra del Fuego en 1945 (Pérez, 2018).

Ese mismo año, la Compañía de Aceros del Pacífico realizó el descubrimiento de un yacimiento de calizas en la Isla Diego de Almagro (Biese, 1945), que dio cuenta de un aspecto de la geología del borde occidental de Magallanes hasta entonces desconocido, y que apuntala, junto a la explotación de carbón y al descubrimiento del petróleo en Springhill, las perspectivas industriales del Chile de mediados del siglo XX.

En 1981 la imagen de subsuperficie dio un nuevo avance con la adquisición de sísmica 3D realizada por la Empresa Nacional del Petróleo en medio del Estrecho de Magallanes. Todo el volumen de roca sedimentaria que llamamos Cuenca de Magallanes o Austral, que ocupa parte de la precordillera y planicies orientales de Chile y Argentina, posee hoy una importante cobertura de sísmica 3D, la cual permite visualizar y estudiar el paisaje de la región como nunca antes se pudo hacer, no solo entregando información de la configuración estructural y estratigráfica en profundidad, sino que además pudiéndose indagar en múltiples propiedades físicas de las rocas.

En la década de los 60s, la ciencia del paisaje experimenta un nuevo cambio paradigmático con el nacimiento de la “Tectónica de Placa”, una teoría que llegó a unificar varias ramas de la geología que antes parecían independientes. Rápidamente, las nuevas ideas de un paisaje móvil, dividido en placas que se montan, desplazan o separan unas de otras, van a condicionar la interpretación del paisaje Magallánico. Así, nació la idea de una Tierra del Fuego dividida entre dos placas tectónicas, se entendió la rectitud de los canales fueguinos, se explicó el levantamiento de la cordillera a través de la subducción en el Pacífico, se relacionó a estos levantamientos orogénicos el desarrollo del relleno sedimentario que llamamos cuenca de Magallanes o Austral, se comprendió que las calizas de Isla Diego de Almagro, ajenas a la geología circundante, podrían haber viajado cientos de kilómetros hasta colisionar con la Patagonia. En general, la historia de formación del paisaje magallánico se fue poblando de choques de placas, cordilleras ya inexistentes y mares que hasta hace poco lo inundaban todo. Bajo este paradigma se han interpretado los datos sismológicos en la región, que en los últimos años han ido en aumento gracias a las diversas campañas que han instalado estaciones móviles y por la red sismológica desplegada por ENAP en 2019, la cual cuenta con 8 estaciones. Esta información ha sido utilizada para indagar sobre el comportamiento tectónico de la región y su configuración en subsuperficie.

Los intentos para asignar una edad al paisaje Magallánico también se desarrollaron de la mano de los nuevos descubrimientos en otras áreas del conocimiento humano. Darwin ordenó la estratigrafía de la región de manera relativa: sólo podía saber qué suceso geológico ocurrió antes o después de otro a través de una serie de principios introducidos principalmente por Steno (1668) y Hutton (1785). Sin embargo, a comienzos del siglo XX se desarrollaron los métodos de datación absoluta de las rocas a través del decaimiento radioactivo. En medio siglo la edad de la Tierra pasó de tener cientos de millones de años a 4500 (+ 300) millones de años (Brush, 1989). Las dataciones absolutas en la región comenzaron a medirse entre la década del 60 y 70, principalmente en rocas cristalinas provenientes de la Cordillera Patagónica y Fueguina. En las últimas décadas se ha extendido su uso a rocas sedimentarias y han sido un aporte importante en mejorar la estratigrafía de la región.

En la actualidad la geología continúa explorando tridimensionalmente la composición y edad del paisaje Magallánico, incorporándolo en los procesos aceptados por los paradigmas vigentes. La cosmogonía Selk'nam nos enseña que existen más formas de idearlo. La ciencia siempre es una mirada subordinada a nuestra manera de interpretar los datos y nuestros valores culturales. Por esta razón es labor del geólogo expandir esa mirada a nuevas dimensiones del paisaje, tal como como lo han hecho a lo largo de la historia, generaciones de observadores del paisaje de la región.

Palabras Clave: Estrecho de Magallanes, Tierra del Fuego, Patagonia, Paisaje, Geomitológia.

Agradecimientos: Los autores agradecen a las gerencias de ENAP Magallanes por brindar su invaluable apoyo y a Pablo Mella y Carolina Berrocal por sus comentarios y observaciones que mejoraron el presente trabajo.

Referencias:

- Biese, W. Informe geológico sobre los yacimientos de caliza y mármol de la isla Diego de Almagro. Inédito. Soc. Aust. de Mármoles.
- Brush S. G., 1989, The Age of the Earth in the Twentieth Century. Earth Sciences History, 1989, 8(2). Claude C. Albritton, Jr. (1913 - 1988), pp170-182.
- Gusinde, M. 1982. Los indios de Tierra del Fuego: resultado de mis cuatro expediciones en los años 1918 hasta 1924, organizadas bajo los auspicios de Ministerio de Instrucción Pública de Chile. Traducido de la edición austríaca bajo la dirección de Werner Hoffmann y con la revisión técnica de Olaf Blixen. 1a. ed. Buenos Aires: Centro Argentino de Etnología Americana, 1982-1991. Tomo I en Vol. II.
- Pigafetta A. 1533. Primo Viaggio Intorno al Globo Terracqueo ossia Ragguagliodella Navegazione alle Indie Orientali por la via d'occidente, 1519-1522. Milano.
- Rogers, S.; Lau, L.; Dowey, N.; Sheikh, H.; Williams, R. Geology uprooted! Decolonising the curriculum for geologist. Geosc. Comm. 5; p.189-204.
- Rosenberg G. D. 2009. The Revolution in Geology from the Renaissance to the Enlightenment. GSA.
- Stafford, R. A. 1984. Geological surveys, mineral discoveries, and British expansion, 1835-71. The Jour. Imp. Com. Hist., 12(3), pp.5-32.
- Urbina X. 2018. El significado del Estrecho de Magallanes entre los siglos XVI y XVIII y su efecto en la prefiguración de Aysén, Rev. Ays. 5, pp.43-50.
- Vitaliano D. 1973. Legends of the Earth: Their Geologic Origins. Ind. Univ. Press, 305p.
- Zappettini E. y Mendiá J. 2009. The first Geological map of Patagonia, Rev. Asoc. Geol. Arg., 64(1) pp.55-59.

Hedwig Tushnelda Kniker (1891-1985): pionera de la micropaleontología en Magallanes

Álvaro Pérez Pérez¹, Danilo González Faletto¹

(1) Empresa Nacional del Petróleo, Depto. de Estudios de Exploración, José Nogueira 1101, Punta Arenas, Chile

Encomendados por la Corporación de Fomento y con el fin de evaluar las posibilidades petroleras de la Provincia de Magallanes, en el año 1942 arribaron a Chile los técnicos de la United Geophysical Company (UGC). En este contingente, figura un nombre femenino: Hedwig Tushnelda Kniker, especialista en micropaleontología. Su incorporación a este equipo, lejos de tratarse de un hecho anecdótico o casual, fue determinado por su experiencia y dedicación a este tema, y por el que es reconocida entre las fundadoras de esta disciplina aplicada a la exploración petrolera.

H. T. Kniker nació el 13 de noviembre de 1891, en Gay Hill, Texas, en una familia de inmigrantes alemanes. Entre 1913 y 1916 estudió en la Universidad de Texas (UT), obteniendo un bachillerato en alemán, psicología y geología, para luego recibir una maestría, en 1917. Por último, realizó estudios de micropaleontología en las universidades de Cornell y Chicago.

Se desempeñó en el Bureau de Geología Económica de la UT hasta 1921, cuando comienza a trabajar para Texaco, en Houston. En este tiempo, la industria petrolera no disponía aún de registros eléctricos ni de perfiles sísmicos con los cuales predecir la profundidad de los reservorios. En superficie, la guía exploratoria consistía en encontrar emanaciones superficiales de hidrocarburos. En subsuelo, sólo se disponía de la descripción de *cuttings*, con las que se construían correlaciones, no obstante, su recuperación solía ser pobre.

La situación era aún más dramática en la costa del Golfo de Texas, donde los diapiros salinos producen el plegamiento de las capas, haciéndolos perder continuidad lateral, y consecuentemente, complicando el desarrollo de los campos petroleros. En este contexto se encarga a tres geólogas la expresa misión de utilizar microfósiles para resolver estos problemas estratigráficos: Alva Ellisor, Esther Richards y H.T. Kniker. Esta tarea se enmarcaba en el paradigma dominante de la época: los microfósiles carecían de valor estratigráfico, dado que se trataba de organismos unicelulares que no habían evolucionado o cambiado significativamente como los animales más grandes y complejos, es decir, microfósiles (Gries, 2018).

No obstante, la solución vendría dada por el uso de microfósiles, particularmente foraminíferos; y es que, al tratarse de materiales tan partidos y mezclados, la búsqueda de ammonites y bivalvos en los "cuttings" era compleja. Así lo notaron en el otoño de 1921 Alva Ellisor y Esther Richard, cuando encontraron la misma colección de foraminíferos en dos pozos del Golfo de Texas, que luego correlacionaron con conjuntos de faunas de otros pozos del área. H. T. Kniker se unirá a este trabajo en 1922, que concluirá con una publicación en la AAPG, en 1925.

El impacto de esta tecnología se manifiesta en la siguiente cita de Gries (2018): Hacia 1931, el 75% de los pozos petroleros que se completaban en los Estados Unidos ocupaban correlaciones guiadas por micropaleontología. A su vez, 300 micropaleontólogos fueron empleados en la industria petrolera y 31 departamentos de geología ofrecían cursos del ramo.

Desde 1930, H. T. Kniker trabaja como consultora desde San Antonio, hasta 1942, cuando se incorpora al equipo de la UGC, estableciéndose en Punta Arenas, Chile. En este período se hace cargo de la creación del laboratorio de micropaleontología de la CORFO en Punta Arenas, preparando a los primeros ayudantes y técnicos chilenos (Mordojovich, 1951), entre los que se cuenta a Eduardo Severín, quién continuó trabajando en la disciplina al crearse la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), hasta fines de los años 70.

Glen Ruby, geólogo jefe de la UGC en Magallanes, da cuenta de la nostalgia que le producía a H. T. Kniker estar lejos de su hogar, mientras participaban de una campaña de geología de superficie en Tierra del Fuego. No obstante, en tanto identificó algunos foraminíferos a través de su lupa binocular: "she really danced a German jig". Asimismo, reconoció su valiosa contribución al trabajo realizado por el equipo (Sawyer, 1975).

En 1950 retorna a Texas. En este período publica junto a Judith Todd su trabajo sobre los foraminíferos de la formación Agua Fresca (Todd & Kniker, 1952), en el que establece un sistema bioestratigráfico para esta porción del Eoceno. Este escrito es el punto de partida de todos los trabajos desarrollados en torno a este tema en Magallanes, como los de Cañón (1968) y Natland et al (1974).

En 1970 se muda a San Antonio, Texas. Su fallecimiento ocurre el 12 de octubre de 1985. Por voluntad testamentaria, financió la compra de 39 campanas para el campanario de la UT, las cuales se sumaron a las 17 preexistentes. Desde entonces, este es el carillón más grande de Texas. En 1987, este edificio fue nombrado y dedicado a su benefactora (Briscoe Center, 2018).

Palabras Clave: Hedwig T. Kniker, Magallanes, petróleo, bioestratigrafía, micropaleontología.

Agradecimientos: Los autores agradecen a las gerencias de ENAP Magallanes por permitir la publicación de este trabajo y brindar su invaluable apoyo otorgando el tiempo y los recursos necesarios para su realización.

Referencias:

- Amplin, E., Ellisor, A., & Kniker, H. T. (1925). Subsurface stratigraphy of the coastal plain of Texas and Louisiana. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 9(1), 79-122.

- Briscoe Center, F. A. (2018). A Guide to the Hedwig Thusnelda Kniker Family. (1 de 10 de 2018) Obtenido de Briscoe Center for American History The University of Texas at Austin: <https://legacy.lib.utexas.edu/taro/utcah/03342/cah-03342.html>.
- Cañón, A. (1968) Cronoestratigrafía de los sedimentos terciarios de Tierra del Fuego, Provincia de Magallanes. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Geólogo. Inédito, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Gries, R. R. (2018). How female geologist were writing out the history: The micropaleontology breakout. En B. A. Johnson (Ed.), Women and Geology: Who are we, where have we come from, and where are we goin? (págs. 11-21) Geological Society of America, Memoir 214.
- Mordojovich, C. (1951). El laboratorio micropaleontológico de Punta Arenas, Chile. Punta Arenas: Inédito, Archivo Técnico de Exploraciones, ENAP Magallanes.
- Natland, M. L., González, E., Cañón, A., & Ernst, M. (1974). A System of Stages for Correlation of Magallanes Basin Sediments. Geological Society of America.
- Sawyer, J. H. (1975). Latin America after 1920. En E. W. Owen, Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum. AAPG Memoir, No. 6.
- Todd, J., & Kniker, H. T. (1952). An Eocene foraminiferal fauna from the Agua Fresca Shale of Magallanes Province, Southernmost Chile. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication No. 1.

El “francés” del Movimiento de Izquierda Revolucionaria (MIR): la persecución política post golpe al académico e investigador Reynaldo Charrier González

Edmundo Polanco Valenzuela¹

(1) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Departamento de Geología General, Unidad de Geología Regional, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile.

“...No hay historia muda. Por mucho que la quemem, por mucho que la rompan, por mucho que la mientan, la historia humana se niega a callarse la boca....” Eduardo Galeano.

Introducción

La persecución posterior al golpe de Estado del 11 de septiembre de 1973 a simpatizantes de la Unidad Popular (UP) se extendió a todos los ámbitos de la vida pública y privada. Muchos no aguantaron y salieron fuera del país buscando una nueva vida. También fue la oportunidad para que cualquiera fuera objeto de denuncias por parte de algún vecino o colega rencoroso acusándolo de “upeliento”, “rojo”, comunista, marxista, mirista, etc. En el caso las geociencias, es conocido el tristemente célebre Óscar González Ferrán quien denunció, entre otros, a los destacados y conocidos académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Ricardo Thiele Cartagena y Lautaro Ponce Mori de los departamentos de Geología y Geofísica, respectivamente (Polanco, 2014 y Polanco, 2017). Significó ser apresados y duramente torturados, primero en Londres 38 y luego en Tejas Verdes. Gracias a una importante presión, tanto nacional como internacional, ambos lograron finalmente salir vivos después de haber pasado por el infierno. Uno de los hechos poco conocidos fue la instauración post golpe de fiscales al interior de las facultades de las universidades que inicialmente fueron civiles, quienes recibían las denuncias por escrito de parte del personal de la universidad, así como de estudiantes. Hay un libro publicado el año 2016, “La dictadura de los sumarios (1974-1985)” que relata una pequeña parte de estos hechos, basado en el hallazgo y digitalización de una serie de sumarios administrativos realizados en la dictadura cívico-militar a personal y estudiantes de la comunidad de la Universidad de Chile. En particular, varios académicos y estudiantes del Departamento de Geología fueron citados por el fiscal de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en calidad de acusados. El Dr. Luis Aguirre como ex Director del Departamento de Geología fue uno de los primeros (Polanco, 2018), pero también Reynaldo Charrier, convocado por el fiscal para recabar más información respecto de ciertas acusaciones, algunas falsas y todas malintencionadas. El penoso caso del Dr. Aguirre, quien tuvo la oportunidad de acceder a la carta acusatoria y, muy tristemente, reconoció a su “colega” José Corvalán entre los firmantes.

A la larga, la persecución y, el viciado y enrarecido ambiente imperante al interior del Departamento de Geología, significó la pérdida de varios académicos y estudiantes, algunos “forzados” a realizar doctorados y otros directamente autoexiliados, generando en lo inmediato una merma significativa del valor científico-académico para el departamento y la universidad y, en definitiva, para nuestro país.

El profesor Reynaldo Charrier (Premio Juan Brüggen año 2000, Miembro Honorario de Geological Society of America-GSA 2019, entre otros), uno de los académicos e investigadores de las geociencias nacionales más galardonado junto al también célebre Dr. Francisco Hervé. El Dr. Charrier, profesor titular de la carrera de Geología de la Universidad de Chile (1966-) y de la Universidad Nacional Andrés Bello (2011-), fue hace un par de años reconocido entre los primeros 10 investigadores de la Ciencias de la Tierra más destacados de Chile. A ello, se suma la gran cantidad publicaciones y de memorias de título que ha guiado a lo largo de los años que también reflejan lo fructífero de su carrera profesional. Habla un francés perfecto dado su ascendencia paterna que le confiere la doble nacionalidad, además de alemán e inglés. No obstante, sólo entre su círculo más cercano se conoce los momentos amargos y horribles que están relacionados a la persecución política sufrida post dictadura. En este sentido, hay tres hechos entrelazados que constituyen este relato que pretende ser simplemente una contribución al tema de la memoria de la historia reciente a 50 años del golpe cívico-militar que quebró la democracia de nuestra República.

Los acontecimientos

Días antes del golpe de Estado, se había iniciado una transecta de los Andes, entre Santiago y Mendoza, en el marco de un proyecto del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP) auspiciado por UNESCO. En ella participaban el Dr. Luis Aguirre, Reynaldo Charrier, Enrique Tidy y Estanislao Godoy (Pirzio) del Departamento de Geología, además del geólogo francés recientemente fallecido Jean Claude Vicente (16/12/2022). El 11 de septiembre se cerró la frontera lo que obligó al finalizar la transecta y, luego de 10 pudieron ingresar a Chile, donde los militares detienen inicialmente a Jean Claude Vicente al escuchar el comentario en voz de Pirzio que era francés. Ahí es muy probable que señaló inocentemente y sin suponer las consecuencias que dos de sus colegas eran de izquierda. A él lo soltaron inmediatamente porque tenía estatus diplomático y, don Luis Aguirre y Reynaldo Charrier fueron detenidos y llevados en un vehículo a Río Blanco custodiándolos con fusiles. Ambos son trasladados a Los Andes donde pasan una noche en el calabozo de la comisaría y, finalmente, los liberan logrando regresar por sus propios medios a Santiago.

El Movimiento de Izquierda Revolucionaria (MIR) se funda en 1965 por diversos grupos de obreros, sindicalistas y estudiantes universitarios de ala de la izquierda revolucionaria (no reformista) que muy influenciados por el triunfo de la Revolución Cubana (1959) creen firmemente en la vía armada para instaurar el poder popular entre ellos que se encontraban marxistas leninistas, trotskistas, guevaristas, anarquistas y descolgados más radicales de los partidos tradicionales de izquierda (partidos Comunista y Socialista y menor medida del Partido Radical). El año 1967, en los inicios del gobierno de Frei Montalba, el carismático Miguel Enríquez junto a Luciano Cruz y Bautista van Schouwen se hacen con la conducción del MIR donde se inicia un periodo de clandestinidad de sus cuadros y la proliferación de asaltos a bancos que tiene una tregua con la candidatura de Salvador Allende por la Unidad Popular, donde incluso algunos miembros llegaron a formar de Grupo de Amigos del Personales (GAP) que proporcionaban

seguridad al candidato de la izquierda. Es precisamente en el gobierno de la Unidad Popular y en el carisma de sus líderes que crece la militancia del MIR, en especial, en el mundo universitario, en hijos e hijas de familias acomodadas y conservadoras de clase media a alta del país. En este sentido, el profesor Reynaldo Charrier a sus 31 años, reunía todas las condiciones para pertenecer al MIR a ojos de los aparatos de seguridad de la dictadura cívico-militar: Servicio de Inteligencia Militar, Servicio Inteligencia Naval y Dirección Inteligencia Nacional (SIM, SIN y DINA, respectivamente). Esta última dependiente directamente del dictador Augusto Pinochet. La DINE recopilaba información de los grupos de extrema izquierda en las universidades desde fines de los años 60 a través de informantes e infiltrados (e.g., Tótoro y Rebolledo, 2021). Es probable que las sospechas de la militancia en movimiento de extrema izquierda fueron alimentadas por el soplónaje que relata Tótoro y Rebolledo (2021) en su libro donde la envidia y rivalidad o, simplemente, el rencor fueron ingredientes para fabricar evidencias en contra del profesor Charrier que hicieron posible que fuera fichado por los servicios de seguridad. No obstante, había elementos que efectivamente tenían un sustento para sospechar de su potencial militancia política: efectivamente tenía de ideas abiertamente de izquierda y tenía el aspecto y perfil del mirista universitario. Todo lo anterior, se conjuga probablemente para que en 1974 estando en su oficina es sorpresivamente visitado por dos militares para “entrevistarlo” a propósito de su colega y ex compañero Claudio Gallardo y su relación con él. Lo cierto es que eran muy amigos aunque desconocía su activismo político secreto como militante del MIR. La escasa rigurosidad o sencillamente negligencia en el informe de dicha entrevista por parte de los miembros de la policía militar que lo visitaron, convierten a Reynaldo Charrier en militante de extrema izquierda y tuvo fuerte repercusión con el hecho que se relata detalladamente en Hervé y Charrier (2015) y que se resume a continuación:

Meses antes de finalizar su Doctorado en Ciencias en la Universidad Libre de Berlín (Alemania, 1981), el profesor Reynaldo Charrier se entera que tiene prohibición de ingresar a Chile, información transmitida por el Ministerio del Interior de nuestro país, es decir, tenía “ficha” (conocido en la jerga como “papeles sucios”). Esto, significaba que estaba marcado y, por lo tanto, a su regreso al país sería muy probablemente detenido por agentes de la temida Central Nacional de Investigaciones (CNI, heredera de la DINA), uno de los organismos de la dictadura causante de la tortura, muerte y desaparición de miles de personas. Ante el horror de este futuro contacta a las autoridades chilenas en Alemania con el objeto de indagar su situación, donde ésta le fue confirmada.

El geólogo Andrés Dávila (el “Loco” y/o “Flaco”) de una calidad humana notable de clara orientación política de derecha y pro-dictadura fue quien intervino, con el importante apoyo de Francisco Hervé. Los personajes fueron los que usaron sus importantes influencias para corregir el error en los antecedentes de Reynaldo Charrier. El hermano gemelo del “Flaco” Dávila era juez y, dos de sus tíos eran el entonces Coronel del Ejército Juan Guillermo Toro Dávila del círculo cercano a Pinochet y Agustín Toro Dávila, Ministro de Minería (1974-75), Intendente de la Región de Bío Bío (1976-77) y Rector Designado de la Universidad de Chile (1977-79).

Epílogo

Si el Prof. Reynaldo Charrier no hubiese tenido a esos contactos que se atrevieron a esclarecer su situación y limpiar sus antecedentes sería una víctima más de las 40.175 del terrorismo de Estado que imperó durante la dictadura cívico-militar (1973-90) e incluso ser el 1.211 detenido desaparecido o el 2.106 ejecutado político. Como lo señaló el Prof. Klaus-Joachim Reutter, director de la tesis de nuestro colega, al enterarse de lo que había ocurrido con ese error de identidad, ¿cuántos habrán sido fusilados por errores como ese? El mismo Cónsul de Chile en Berlín manifestó, una vez resuelto el problema, “cuántos de los exiliados que tengo aquí en Berlín estarán en esa misma situación y no tienen, como usted, los contactos para modificar su situación”.

Finalmente, en palabras de Claudio Nash, destacado abogado de derecho internacional y académico de la Universidad de Chile coordinador de Cátedra de Derechos Humanos los “actos de persecución y delación son moralmente condenables e inaceptables en una comunidad universitaria”.....y.... “las responsabilidades no son sólo las legales. También son morales e históricas, ambas fundamentales para la convivencia universitaria”.

(<https://uchile.cl/noticias/120770/catedra-ddhh-pide-que-universidad-reconozca-persecucion-en-dictadura>)



Fotografía reciente del autor junto al profesor Reynaldo Charrier y a otro de los protagonistas de esta historia, Francisco Hervé. En la foto también aparecen los colegas Cristóbal Ramírez y Antonio Bravo.

Palabras Clave: Dictadura cívico-militar, Persecución política, Memoria histórica.

Financiamiento: Una aclaración necesaria. El Profesor Reynaldo Charrier nunca militó en el MIR o similar grupo de extrema izquierda, aunque efectivamente tiene doble nacionalidad: chilena y francesa.

Agradecimientos: Al protagonista de estas historias quién me dio la oportunidad de recorrer algunos de los amargos y oscuros episodios que le tocó vivir en el pasado reciente de nuestro país.

Referencias:

- Hervé F., Charrier R. 2015. Historia de una arbitrariedad cometida por el gobierno de Chile durante la dictadura con un académico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, Simposio 8: Historia de la Geología, 578-580.
- Polanco E. 2018. Tres historias del Dr. Luis Aguirre Le-Bert. Resúmenes, XV Congreso Geológico Chileno, GEOS-2: IX Simposio de Historia de la Geología, Concepción.
- Polanco E. 2017. El retorno de un sismólogo o la historia de un sismólogo retornado. VII Simposio de Historia de la Geología, Sociedad Geológica de Chile, Santiago.
- Polanco E. 2014. La geología y el golpe de estado de 1973. Actas digitales del V Simposio de Historia de la Geología en Chile, Santiago.
- Tótoro D. , Rebolledo J. 2021. Rati, Agente de la Oficina. La 'Pacificación' en Democracia. · Ceibo Ediciones, 302 p.

Una revolución en la petrología de Argentina y Chile a mediados del siglo 20: Félix González Bonorino

Víctor Alberto Ramos¹

(1) Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Ciudad Universitaria, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

Félix González Bonorino fue un geólogo que produjo importantes cambios en la comunidad geológica de nuestros países a partir de la mitad del siglo XX. Los inicios de la Geología tanto en Córdoba como en La Plata y Buenos Aires y en menor medida en Chile, estuvieron ligados a una fuerte influencia germana que perduró hasta mediados de ese siglo. Su formación de posgrado con los mejores petrólogos de Estados Unidos, junto con sus diversas estadías en ese país, le permitieron traer una sólida experiencia y nuevas ideas, con una visión diferente de la enseñanza que dominaba por aquel entonces en nuestras universidades. Su capacidad de trabajo tanto en el gabinete como en el campo, junto a su sólida formación, le permitieron entender los procesos que formaron el basamento cristalino de nuestras Sierras Pampeanas, su estructura cenozoica, el origen de su esquistosidad y su control en las estructuras ándicas. Si bien su fuerte era la Mineralogía y la Petrología, fue pionero en la enseñanza de la Sedimentología y en la investigación de los sedimentos de nuestra pampa húmeda. Tuvo que emigrar a Chile después de los malos tratos sufridos en “*la noche de los bastones largos*” en 1966 donde fue recibido en su Universidad. Esos años en Chile le permitieron reinterpretar con sus nuevas ideas el basamento metamórfico expuesto en el margen chileno, produciendo una revolución de los conceptos. Decidió dejar Chile en solidaridad con otros profesores argentinos expulsados, siendo invitado por la Fundación Bariloche a radicarse en esta localidad donde reanuda sus estudios iniciales de la Cordillera Patagónica. Además de sus aportes científicos se destacó por su gestión tanto en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, como en el Instituto Nacional de Geología y Minería y el Conicet. Estas instituciones vivieron años fundacionales de profundos cambios y avances en la enseñanza y el conocimiento con nuevas perspectivas que marcaron por décadas su influencia. No hay duda de que ha sido el geólogo más influyente y capacitado de esos tiempos en la Argentina y quizás en Chile.

Palabras Clave: Petrología, Cristalización fraccionada, Evolución magmática, Alteración hidrotermal, Frentes de alteración.

Financiamiento: Personal.

Agradecimientos: A todos los geólogos chilenos y argentinos que han contribuido con sus observaciones.

La influencia del naturalismo del siglo XIX en la geología de Tarapacá

Diego Andrés Rojo Martel¹, Hrvoj Ostojčić Perić²

(1) Universidad de Buenos Aires, Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Buenos Aires, Argentina

(2) Centro Cultura Doña Vicenta, Esmeralda 743, Iquique, Chile

Durante el estadio temprano del siglo XIX, Tarapacá experimentó un importante periodo de metamorfosis geopolítica, el cual estuvo controlado por el desvanecimiento de una economía basada en la industria argentífera, dando paso a un escenario económico dominado por los depósitos evaporíticos de la industria del salitre. La política fue crucial para comprender nuestro territorio. A principios de 1800, el intendente de la provincia Ramón Castilla Marquesado, oriundo de San Lorenzo de Tarapacá, expresó la necesidad de realizar un primer catastro formal que caracterizara la geografía y geología de la región, enfatizando en establecer un reconocimiento de los potenciales recursos naturales presentes en su territorio. Probablemente el interés de estudiar la provincia de Tarapacá a mayor detalle fue condicionado por el decaimiento en la producción de las minas de platas de Huantajaya y Santa Rosa y al aumento creciente de la demanda del nitrato de soda. De hecho, es el mismo Charles Darwin quien mencionó que para 1830 la actividad de la minería de plata había cesado.

En 1827, a petición de Castilla, los ingleses George Smith, administrador de las minas de Huantajaya y el químico William Bollaert, ex ayudante de laboratorio de Michael Faraday, examinaron el distrito, presentando un informe al gobierno peruano. Esta primera expedición a estas tierras nortinas, generó un reconocimiento geográfico de la región, resaltando al nitrato como principal materia de importancia geopolítica. En el documento se destaca que tal apreciado producto se concentra en un área que no se extiende más allá de la quebrada de Camarones por el norte ni más al sur del río Loa. En adición, los naturalistas observaron y probablemente fueron los primeros en definir técnicamente los límites y reconocer las principalmente morfoestructuras de primer orden de la región de Tarapacá, delimitando los márgenes de la provincia: *“se encuentra entre los 19° y 21° 30' S y 68° 15' y 70° 22' W. Se limita al N por Arica, en el E por Bolivia, en el S por el desierto de Atacama, y en el W por el Océano Pacífico”* (Bollaert, 1851).

Sus observaciones describen las áridas montañas de la costa que se levantan *“a menudo abruptamente desde el mar, de 3000 a 6.000 pies (ca. 900 y 1800 metros) por encima de él, y unas 30 millas (48 km) de ancho”* definiendo lo que actualmente conocemos como Cordillera de la Costa, que está totalmente destituida de vegetación, y gran parte de su superficie está cubierta por arena y sal, así como de otras sustancias salinas. Según Bollaert, cuando las sales eran mezcladas con la arena recibían el nombre de caliche. Adyacente a la cordillera se encuentra la actual depresión central conocida como la Pampa o Gran Planicie del Tamarugal, la cual se ubicaba a 3.000 y 3.500 pies sobre el nivel del mar, y era descrito como un gran depósito de arena, sal, nitrato de soda y otros cuerpos salinos. Un punto importante es que hasta el momento no existe un consenso en cuanto al origen de ciertas sales. Para la época de principio del siglo XIX, una de las posibilidades consideraba que estos depósitos correspondían a aluviones salidos con una fuente de origen en la Cordillera Principal, otra postura sugería que estos correspondían a depósitos establecidos por antiguos océanos. Cruzando la pampa del Tamarugal, es decir, nuestra depresión central, se presenta un territorio desértico y montañoso de *“unos 7000 pies (2133 metros) sobre el mar, refiriéndose a la precordillera, y 20 millas (32 km) de ancho”* además observa un distrito muy roto y en donde se ven los primeros pastos que poco a poco van desapareciendo, resalta que se encuentra a 10.300 a 16.000 pies – ca. 3.100-4.800 metros- de altura. Subsecuentemente, se encuentra en la base de los Andes o Cordillera Real como era conocida en ese entonces, un cordón montañoso que alcanza, según los naturalistas, los 24.000 a 25.000 pies – ca. 7.100 a 7.600 metros- de altura. El volcán de Isluga, debe poseer una *“elevación aproximada de 17000 a 18000 pies (5000 a 5500 metros) sobre el mar”* es decir comienza describiendo parte de la Cordillera Occidental y finalmente se destaca una última morfoestructura correspondiente a la Puna, Páramo o Sierra (Bollaert, 1851).

Es sabido que la porción del norte de Chile -Norte Grande- se conoce por su extrema aridez y grandes salares. En su visita a la región (1835), Darwin menciona que el desierto se compone por una gruesa costra de sal común y por capas estratificadas de aluvión salino formado a medida que la tierra se elevaba por sobre el nivel del mar y que en base la configuración del terreno era evidente que en otro tiempo esta zona debió ser un lago o más probable un brazo de mar, donde la presencia de sales de yodo en la capa salina tendería a confirmar esa última suposición en la llanura. Es interesante cuestionar el fundamento de sus hipótesis/conclusiones, sin tener presente el concepto de la tectónica de placas y los métodos y resultados analíticos que han podido determinar que el alzamiento de la región fue probablemente la causa que comenzó por lo menos hace unos 30 millones de años atrás (cf. Charrier et al., 2007; Lamp, S. 2016).

Bollaert presentaba un gran fundamento geológico como, por ejemplo, en su paso por Arica hace la siguiente descripción sobre la geología del Morro *“El Morro o promontorio de Arica que está a quinientos pies sobre el mar, su base es de gneis, seguida por pórfidos, luego capas horizontales como basalto. La roca de la ciudad es principalmente porfídica, la cual sobreyace a un nivel constituido principalmente de pizarra, la superficie es cubierta de material aluvional y salino”*, o como también la descripción geológica de Huantajaya, mencionando que después del panizo -nivel de mena- se encuentra un nivel de piedra caliza arcillosa, después una formación basáltica dura y una roca silíceas. Adicionalmente menciona que en los chiflones de mina se encuentra una capa gruesa superficial llamada manto, compuesta de conchas fósiles, del género *Gryphaea*, principalmente de la especie *Gryphaea darwini*, mostrando el aporte a los campos de la paleontología (Ostojčić, 2019).

De hecho, luego de recorrer montañas desérticas, rocosas y áridas, el camino da paso a la Pampa del Tamarugal, terrenos ricos en nitratos de soda y abundante sal común, mencionando Bollaert que, al llegar al sector de Las Tizas, encontró un mineral de aspecto calcáreo “Tiza”, el cual al examinarlo concluyó que era un mineral de bórax que resultó ser un nuevo mineral de ácido bórico, Hydroborocalcita o hayescina. Adicionalmente la pickeringita, un mineral que corresponde a un sulfato hidratado de aluminio y magnesio, fue descrito a partir de ejemplares procedentes del cerro Pintados. No solo se le puede adjudicar el reconocimiento de nuevos minerales sino también de impresionantes estructuras morfológicas. Por ejemplo, Smith y Bollaert fueron los primeros en

reconocer el volcán Isluga, que no les pareció cónico, que en la base se escucharon varios ruidos y a menudo se sienten terremotos, mencionando su intención de describir los temblores.

La gran inquietud de William Bollaert lo motivó a estudiar las ocurrencias geológicas. De esta manera, abandona Tarapacá en 1828 e inicia una expedición hacia el sur, con el fin de estudiar los aspectos geológicos del territorio suroccidental de Sudamérica. Las observaciones de Bollaert, finalmente son publicadas en la obra *“Observations on the Geography of Southern Peru. Including Survey of the Province of Tarapacá, and Route to Chile by the Coast of the Desert of Atacama”* en la revista *“Journal of the Royal Geographical Society of London”* en 1851. El periplo de Bollaert culminaría en Concepción, después de estudiar las características geológicas de la Isla Quiriquina, para luego emprender rumbo al norte hacia la bahía de Valparaíso y de esta manera gestionar su retorno a Inglaterra. De manera casi etérea, el retorno de Bollaert coincide con el arribo de *His Majesty’s Ship Adventure (H.M.S. Adventure)*, una embarcación que ancla el 2 de enero de 1830 en la bahía de Valparaíso. La expedición era comandada por el capitán *P.P. King*, y además encontraba entre sus filas a Robert Fitz-Roy, según menciona Bollaert (1851). El 11 de febrero de 1830, Bollaert expresa *“Me embarqué a bordo del buque de H.M. Adventure, del Capitán P.P. King, quien me permitió el paso”*. Durante su retorno, el capitán P.P. King visita diversos lugares, tales como la Isla Juan Fernández, Concepción, Chiloé, Patagonia, Tierra del Fuego, entre otros lugares, y en donde Bollaert compartió diferentes experiencias y conocimientos con Fitz-Roy.



Volcán Isluga de Bollaert, 1860. En la porción inferior una visión actual de la localidad análoga.

A su arribo el *His Majesty Ship Beagle (H.M.S. Beagle)* menciona que la Isla – probablemente haciendo alusión a la Isla Serrano-, es un afloramiento cubierto por guano de aves -actualmente unida artificialmente al puerto de Iquique- captando la atención del capitán Fitz-Roy que expresó *“Esta isla fue alguna vez mucho más alta, las muchas cargas de estiércol la han llevado a reducirse a su actual estado bajo”* un concepto que parece aludir al término de isostasia y que parece futurista en el campo de la Ciencias de la Tierra para la época.

Paralelamente, Charles Darwin describe de manera tácita las principales morfoestructuras de la región, iniciando la descripción en la ciudad de Iquique, la cual está ubicada en una llanura de arena, es decir en lo que actualmente conocemos como planicie litoral y que se encuentra adyacente a una gran muralla de roca que se eleva hasta los 2.000 pies de altura – ca. 609 metros-, haciendo alusión al acantilado costero de la parte occidental de la Cordillera de la Costa. Referencias que incluso son ocupadas en textos contemporáneos y que no hacen otra cosa que volver a pensar en las influencias de los naturalistas ingleses.

En la actualidad, escasos o nulos documentos existen, que expliquen la relación o conexión entre Charles Darwin, William Bollaert y George Smith, sin embargo, severas observaciones y discusiones geológicas realizadas por Darwin en su obra del 1839, parecen estar influenciadas por las experiencias vividas por William Bollaert en su larga travesía por Sudamérica. El historiador iquiqueño Hrvoj Ostojčić Perić en su obra **"Huantajaya: El Potosí del Pacífico"** soporta la influencia de Bollaert sobre Darwin, mencionando las citas que involucran a ambos en las actas del 1838 de la *Geological London Society*. Uno de los mejores escenarios que permiten divagar sobre esta conexión es que un 12 de julio de 1835, el capitán Robert Fitz-Roy ancla en la ciudad de Iquique -centro de la isla- puerto principal de la región de Tarapacá, que se ubica a la latitud 20° 12' 30" sur y longitud 70° 15' oeste. Darwin menciona en su bitácora que arrienda unas mulas para iniciar su camino en dirección a La Noria, uno de los primeros pueblos salitreros y administrado por el inglés George Smith el gran amigo de William Bollaert, quien hospeda a Charles Darwin. Finalmente, el trabajo de Bollaert relacionado a las observaciones en la parte austral de Sudamérica es publicado en 1851, mientras que el paso de Charles Darwin por Sudamérica ocurre entre los años 1832-1835 y finalmente su obra "Observaciones por Sudamérica" es publicada en 1839. Por lo tanto, no podemos negar que los naturalistas Smith y Bollaert, influenciaron en su conocimiento y en la comprensión de las ciencias de la Tierra, y que el denominador común entre estos tres personajes en gran parte fue gracias a Huantajaya y los depósitos de nitrato de soda.

Palabras Claves: Huantajaya, Charles Darwin, William Bollaert, Naturalismo, Tarapacá.

Financiamiento: Centro Cultural Doña Vicenta.

Agradecimientos: Centro Cultural Doña Vicenta.

Referencias:

- Bollaert, William, 1851. "Observations on the Geography of Southern Peru. Including Survey of the Province of Tarapacá, and Route to Chile by the Coast of the Desert of Atacama". The Journal of the Royal Geographical Society of London. (21): 99-130. <http://www.jstor.org/stable/1798186>.
- Bollaert, William, 1860. Antiquarian, Ethnological and Other Researches in New Granada, Ecuador, Peru and Chile, with observations on the Pre-Incarial, Incarial, and Other Monuments of Peruvian Nations. Londres: Trübner & Co.
- Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. P., 2007, Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile, Geological Society Special Publication: The Andes of Chile, p. 21-114.
- Lamb, S., 2016. Cenozoic uplift of the Central Andes in northern Chile and Bolivia—reconciling paleoaltimetry with the geological evolution. Canadian Journal of Earth Sciences, 53(11), 1227–1245. [doi:10.1139/cjes-2015-0071](https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0071).
- Ostojčić, H., 2019. Huantajaya el Potosí del Pacífico. Iquique, Tarapacá. Editorial Pino Oregón.

Ibn Sina (Avicena): Su contribución al desarrollo de la geología y su influencia en Occidente

Carolina Silva Parejas¹

(1) Universidad Santo Tomás, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Avda. Ejército Libertador 146, Santiago, Chile

Ibn Sina (Avicena), médico y filósofo persa (981-1037 DC), fue uno de los grandes sabios de la Edad Media y exponente mayor del apogeo del desarrollo científico de la civilización musulmana. Su obra es ampliamente conocida, especialmente por sus aportes en medicina y filosofía, sin embargo, sus importantes aportes en geología son poco conocidos.

Su gran obra *Kitab Al Shifa* (1021-1023 DC) o El libro de la cura (en el sentido de cura o remedio contra la ignorancia), posee una sección completa de mineralogía y meteorología, en la cual se refiere a aspectos tales como la formación de montañas, fuentes de agua, origen de los terremotos, formación de los minerales, etc.

Específicamente, en cuanto a la formación de montañas, Ibn Sina distingue la condición en que se forman las rocas, la manera en que luego se forman las secuencias de roca y finalmente el proceso por el cual las montañas son alzadas y erodadas. Con respecto a los tipos de roca, Ibn Sina establece 3 orígenes: formación de rocas a partir del agua (roca sedimentaria química), a partir del barro (roca sedimentaria detrítica) y a partir del fuego (roca ígnea). No reconoció las rocas metamórficas porque estas fueron conocidas luego del advenimiento del microscopio en Europa.

En este libro, Ibn Sina enuncia también principios fundamentales de la geología, tales como el principio de superposición de los estratos, el concepto de catastrofismo y la doctrina de uniformitarianismo, los cuales habrían inspirado e influenciado a los fundadores del pensamiento geológico en Europa (Leonardo da Vinci, Nicolaus Steno, James Hutton).

Varios historiadores han propuesto que el trabajo de Ibn Sina es original y no producto de un pensamiento griego anterior. De hecho, se ha postulado que el anexo llamado *De Mineralibus*, presente en versiones latinas medievales del libro *Meteorologica* del gran sabio griego Aristóteles, fue en verdad traducido y resumido del libro *Kitab Al Shifa* de Ibn Sina.

Los aportes de Ibn Sina demuestran que los principios fundamentales de la geología serían varios siglos anteriores al Renacimiento en Europa.

Palabras Clave: detrítico, ígneo, metamórfico, catastrofismo, uniformitarianismo.

Referencias:

- Adams, F.D. 1938. The birth and development of the geological sciences. The Williams & Wilkins Company. Baltimore, 506 p.
- Al-Rawi, M. M. 2002. The contribution of Ibn Sina (Avicenna) to the development of Earth Sciences. Foundation for Science Technology and Civilisation, Publication Number: 4039. p. 1-12.
- Avicennae de Congelatione et Conglutinatione Lapidum, being sections of the Kitab Al-Shifa 1021-1023. The Latin and Arabic texts edited with an English translation of the latter and with critical notes by Holmyard E.J. & Mandeville, D.C. Librairie Orientaliste, Paul Geuthner, Paris, 1927, 86 p.
- Baffioni, C. 2011. The causes and features of earthquakes in Avicenna and Fakhr al-Din al-Razi. European Review, Vol.19, N°3, pp. 355-366. Academia Europea [doi:10.1017/S1062798711000123](https://doi.org/10.1017/S1062798711000123).

XVI CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO



Auspiciadores

Categoría Ojos del Salado

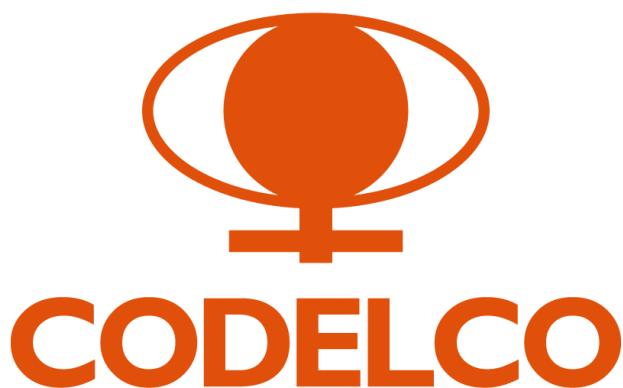


**Soluciones
para el
desarrollo
humano**



Universidad del Desarrollo

Categoría Tupungato



Categoría Torres del Paine

BARRICK



**ANTOFAGASTA
MINERALS**

Exhibidores Comerciales



Auspiciador sesiones de posters coauspiciador concierto inaugural



Apoyo de



Patrocinadores



**International Association
of Hydrogeologists**
the World-wide Groundwater Organisation



Prólogo "Transecta de Cruce de Cordillera (Santiago-Mendoza)"

"La Transecta de Cruce de Cordillera (Santiago-Mendoza), realizada en diciembre de 2023 en el marco del Congreso Geológico Chileno, fue una experiencia enriquecedora tanto en términos científicos como humanos. Esta expedición fue organizada por Reynaldo Charrier, Laura Giambiagi y Pamela Jara, con el invaluable apoyo logístico de Mónica Sorondo, cuya contribución fue fundamental para el éxito de esta actividad.

El objetivo de esta excursión de cuatro días fue introducir a los participantes en los aspectos generales de la evolución tectónica de la Cordillera de los Andes en una de sus secciones más clásicas, por donde Charles Darwin realizó su histórico viaje de ida y vuelta entre Valparaíso (Chile) y Mendoza (Argentina). Durante el recorrido exploramos en detalle las complejidades geológicas de la región, conocimos nuevas evidencias o estudios en cada zona, revisando secciones regionales y locales de la Cordillera Principal, la Cordillera Frontal, la Depresión de Calingasta-Barreal-Uspallata, y la Precordillera, acompañados de una grata discusión científica en cada parada.

Esta transecta nos permitió reunirnos con colegas de diversas disciplinas dentro de la geología, de varias nacionalidades y generaciones. Por ello, esta actividad no solo cumplió con sus objetivos científicos y de enriquecimiento académico, sino que también fomentó un ambiente de camaradería que permitió generar nuevos lazos entre los participantes.

*Quiero cerrar con un personal y afectuoso agradecimiento a nuestros "guías" de terreno, Reynaldo y Laura, por su desinteresada y humilde entrega de su experiencia a todos(as) quienes pudimos participar. El **Libro Guía** de esta Transecta, es justamente el resultado de esa buena disposición y compromiso al compartir sus conocimientos.*

Muchas Gracias

Pamela Paz Jara M."





XVI CGCh
CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO
SANTIAGO 2023
Nuevos desafíos para un territorio en evolución

LIBRO GUÍA TRANSECTA SANTIAGO - MENDOZA



Por: **Reynaldo Charrier.**
Universidad Andrés Bello y Universidad de Chile
Laura Giambiagi.
CONICET Mendoza, Argentina

Organizan:
Pamela Paz Jara M. (Editora XVI CGCh)
Universidad de Santiago de Chile
Mónica Sorondo (Coordinadora General XVI CGCh)
Independiente

2 al 5 de Diciembre de 2023.



[Link de descarga](#)

Choyoy, Triásico y Mioceno en Embalse Potrerillos



Vista general de Fm. Abanico



Gravas del Cerro Penitentes



Gravas montadas por Choyoy, Depresión de Uspallata



Fm. Paramillos. Agua de la Zorra Bosque Fósil de Darwin



Paleozoico entre Uspallata y Polvaderas



Grupo general. Puente del Inca





Nos vemos en el XVII Congreso Geológico Chileno 2026

*Diseño Logo: Diego Zamorano Morales
Diseño e Ilustración Posters: Kevin Quinzacara Vicencio
Diseño y Edición Acta: Metamórfica Producciones*





XVI CGCh

CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO

Nuevos desafíos para un territorio en evolución



Diseño e ilustración: Kevin Quinzacara

SANTIAGO DE CHILE 2023

26 de noviembre al 1 de diciembre





XVI CGCh

CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO

SANTIAGO 2023

26 de noviembre al 01 de diciembre

Nuevos desafíos para un territorio en evolución



ACTA XVI CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO 2023

Nuevos desafíos para un territorio en evolución

