

## **Caracterización de la Red de Fracturas y Propiedades Físicas de las Rocas en el Sistema Geotermal de Nevados de Chillán.**

Valentina Mura<sup>1</sup>, Gloria Arancibia<sup>1</sup>, John Browning<sup>1</sup>, David Healy<sup>2</sup>, Camila Pineda<sup>1</sup>, Fernanda Merchán<sup>1</sup> y Diego Morata<sup>\*3</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

(vmura@uc.cl, garancibiah@uc.cl, jrbrowning@uc.cl, capineda@uc.cl, fmerchan@uc.cl)

<sup>2</sup> Geosolutions Leeds, School of Earth & Environment, University of Leeds, Leeds, UK.

(d.healy@leeds.ac.uk)

<sup>3</sup> Departamento de Geología, Universidad de Chile, Chile.

(dmorata@ing.uchile.cl)

**Keywords:** red de fracturas, propiedades físicas, sistema geotermal, circulación de fluidos.

### **ABSTRACT:**

La circulación de fluidos en el Sistema Geotermal Nevados de Chillán, en la Zona Volcánica Sur de los Andes (Chile), está controlada por la combinación de una red de fracturas y las propiedades físicas de las rocas que hospedan el reservorio geotermal. Estos factores controlan la permeabilidad del medio y, en consecuencia, la circulación de fluidos geotermales. Este estudio presenta una caracterización detallada de la red de fracturas a partir de datos recopilados en terreno, complementados con análisis de imágenes satelitales y registros obtenidos mediante dron. Se determinaron parámetros clave como la orientación, densidad y conectividad de las fracturas, fundamentales para comprender la arquitectura del sistema geotermal. Asimismo, se realizaron ensayos de laboratorio en muestras representativas de roca, evaluando propiedades físicas como densidad, porosidad y velocidades sísmicas. Los resultados permitieron identificar zonas altamente fracturadas que favorecen el flujo de fluidos. Las propiedades físicas de las rocas muestran variaciones en función de la litología y del grado de alteración hidrotermal, lo que influye directamente en su capacidad de almacenamiento y transporte de fluidos.

Este estudio contribuye de manera significativa a una comprensión más profunda del comportamiento del sistema geotermal de Nevados de Chillán y entrega información valiosa para su exploración y desarrollo. Además, destaca la relevancia de integrar el análisis estructural con la caracterización físico-mecánica de las rocas para evaluar la viabilidad de sistemas geotermales en contextos volcánicos activos.

## **1. Introducción**

Los sistemas geotermales en contextos volcánicos activos están fuertemente condicionados por la interacción entre las estructuras geológicas y las propiedades físicas de las rocas que los albergan (Caine et al., 1996; Bense et al., 2013; Moeck, 2014; Mura et al., 2025). En particular, la orientación y conectividad de fracturas influye directamente en la permeabilidad del subsuelo, controlando la circulación de fluidos (Caine et al., 1996; Bense et al., 2013) y, por ende, el potencial energético de estos sistemas. Comprender esta relación es esencial para la evaluación, exploración y eventual explotación sostenible de los recursos geotermales (Moeck, 2014).

El sistema geotermal de Nevados de Chillán (SGNCh), localizado en la Zona Volcánica Sur de los Andes en Chile, constituye un caso representativo de estos entornos. A pesar de su reconocida actividad volcánica y su potencial geotérmico (Aravena et al., 2016; Benavente et al., 2019), aún existen vacíos en el conocimiento respecto a la arquitectura de su red de fracturas y a las características físico-mecánicas de las rocas involucradas. Estos factores son determinantes para la caracterización del reservorio y la estimación de su capacidad de almacenamiento y conducción de fluidos (Evans et al., 1997; Heap & Kennedy, 2016).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo establecer la relación entre la geometría de la red de fracturas (orientación, longitud, conectividad) y las propiedades físicas de las litologías presentes, tales como densidad, porosidad y velocidades sísmicas, para identificar zonas con mayor potencial de flujo geotermal. Esta aproximación contribuye al conocimiento de la dinámica del SGNCh, entregando información clave para futuras iniciativas de exploración en la región. Para ello se caracterizó el SGNCh mediante un enfoque integrado que combina datos estructurales recolectados en terreno, análisis de imágenes satelitales y aéreas, y ensayos de laboratorio sobre muestras de roca. Se realizaron ensayos experimentales en litologías representativas del SGNCh bajo condiciones secas, aplicando presiones de confinamiento de hasta 150 MPa y tratamientos térmicos de hasta 600 °C, los

cuales permitieron evaluar la evolución microestructural de las rocas bajo condiciones análogas a las del subsuelo.

## **2. Resultados**

Las litologías estudiadas incluyen rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Cura-Mallín, así como rocas cristalinas del batolito Santa Gertrudis-Bullileo, compuestas principalmente por granitoides y la unidad hornfels. Estas unidades fueron seleccionadas por su relevancia como hospedadoras del sistema geotermal y su interacción con los procesos de circulación de fluidos.

La integración de mediciones estructurales en terreno con el análisis de imágenes satelitales y de dron permitió caracterizar en detalle las redes de fracturas en distintos dominios litológicos. En los granitoides y hornfels se identificaron tres conjuntos principales de fracturas con orientaciones dominantes NNE–SSO, NNO–SSE y E–O (en hornfels también NE–SO). Las rocas volcánicas, en cambio, presentan un patrón más complejo, compuesto por cuatro conjuntos principales: NE–SO, NO–SE, E–O y N–S. Esta variabilidad refleja la influencia de la litología en el desarrollo y organización de las redes de fracturas. Además, se identificaron estructuras de posible control en el flujo local de fluidos, como la Falla Las Trancas (E–W de alto ángulo, sinistral) y un conjunto de fallas inversas NNW de bajo ángulo en el sistema Las Termas–Olla de Mote. La distribución de longitudes de fracturas sigue una ley de potencia con un exponente cercano a -3, lo que indica que las fracturas largas son menos frecuentes que las cortas.

Los experimentos de laboratorio muestran que la velocidad de onda P frente al confinamiento refleja diferencias tanto en la densidad de microfracturas preexistentes, como en la distribución de razones de aspecto de los poros. En particular, las rocas intrusivas del batolito Santa Gertrudis-Bullileo fueron sometidas a tratamientos térmicos adicionales, generando nuevas poblaciones de microfracturas de baja razón de aspecto.

## **3. Conclusiones**

Los resultados obtenidos a partir del análisis estructural y experimental del sistema geotermal de las rocas representativas del reservorio del SGNCH evidencian que tanto la arquitectura de fracturas como las propiedades físicas de las litologías hospedantes ejercen un control significativo sobre la circulación de fluidos geotermales. La caracterización de fracturas en distintas unidades litológicas revela una marcada variabilidad en la orientación, densidad e

intensidad de fracturación, influenciada por la litología y la historia tectónica local. Estructuras como la Falla Las Trancas y el sistema Las Termas–Olla de Mote destacan por su posible rol en la conducción de fluidos a escala local.

Por otra parte, los ensayos físico-mecánicos realizados bajo condiciones de presión y temperatura representativas del subsuelo proporcionaron nuevos antecedentes sobre la evolución microestructural de las rocas del reservorio. Se identificaron diferencias significativas en la respuesta de las litologías del Batolito Santa Gertrudis-Bullileo al confinamiento posterior a tratamientos térmicos, destacando la capacidad para mantener porosidad conectada a mayores profundidades, lo que implica un mayor potencial para el flujo de fluidos en esta unidad.

En conjunto, estos resultados integrados permiten establecer una base para comprender el control estructural y físico del sistema geotermal, contribuyendo al desarrollo de modelos más precisos de circulación de fluidos y a la evaluación del potencial geotérmico en sistemas volcánicos activos de los Andes del Sur.

**Agradecimientos:** Agradecemos al Proyecto ANID-FONDECYT N° 1220729, y al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). El doctorado de V.M. contó con el apoyo de la Beca Nacional de Doctorado ANID N° 21210890.

### References:

- [1] Aravena, A., Morata, D., Reich, M., & Palacios, C. (2016). Geothermal systems in the Southern Volcanic Zone of the Chilean Andes: structural controls and thermogeochemical characteristics. *Geothermics*, 64, 1–14.
- [2] Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., & Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192.
- [3] Benavente, O., Morata, D., Aravena, A., & Reich, M. (2019). Geochemistry and geothermometry of thermal springs in the Southern Andes (Chile): Insights into the regional geothermal potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 381, 512–530.
- [4] Caine, J. S., Evans, J. P., & Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028.
- [5] Evans, J. P., Forster, C. B., & Goddard, J. V. (1997). Permeability of fault-related rocks. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*, 122, 73–91.
- [6] Heap, M. J., & Kennedy, B. M. (2016). Exploring the scale-dependent permeability of fractured andesite. *Earth and Planetary Science Letters*, 447, 139–150.
- [7] Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882.
- [8] Mura, V., Arancibia, G., Browning, J., Healy, D., López-Contreras, C., Morata, D., Maza, S. & Cardona, C. (2025). Structural control on the Southern Andean Nevados de Chillán Geothermal System. *Journal of Structural Geology*, 105380.