

Three-dimensional thermo-hydraulic modeling of complex volcanic geothermal systems: application to the Cerro Blanco Volcanic Complex

Jeremías Likerman^{1,2} , María Clara Lamberti^{1,2} , Lucía Blanco¹, and
Luciana Ruiz¹

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

² Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber” (IDEAN),
CONICET–Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
jl likerman@gl.fcen.uba.ar

Abstract. Volcanic geothermal systems are controlled by the interaction between magmatic heat sources, lithological heterogeneity, fault architecture and hydrothermal circulation. These coupled controls are difficult to assess using only volumetric heat-in-place approaches, especially in young caldera systems where permeability and structural compartmentalization may dominate the distribution of exploitable resources. This short paper presents an ongoing research line focused on the development of three-dimensional thermo-hydraulic simulations of the Cerro Blanco Volcanic Complex (CBVC), Catamarca, Argentina. Cerro Blanco is one of the most relevant geothermal targets in the southern Puna, with recent silicic volcanism, active hydrothermal manifestations and previous resource assessments suggesting significant geothermal-electric potential. The proposed workflow combines geological, structural, geochemical and geophysical constraints into a 3D numerical model implemented with GOLEM, a MOOSE-based framework for coupled thermal–hydraulic processes in fractured rocks. Current work has produced a first geological geometry, preliminary physical parameterization and exploratory simulations. The main methodological challenge is now the optimization of mesh resolution, domain partitioning and numerical configuration to make high-resolution simulations computationally feasible in HPC environments. Expected outcomes include a reproducible modeling workflow, refined discretization criteria for structurally complex zones, and a basis for future predictive simulations of heat and fluid flow in volcanic geothermal systems.

Keywords: geothermal energy , thermo-hydraulic modeling , Cerro Blanco , GOLEM , MOOSE , HPC

Modelado y simulación termo-hidráulica 3D de sistemas geotérmicos volcánicos complejos: aplicación al Complejo Volcánico Cerro Blanco

Abstract. Los sistemas geotérmicos volcánicos están controlados por la interacción entre fuentes térmicas magmáticas, heterogeneidad litológica, arquitectura de fallas y circulación hidrotermal. Estos controles acoplados son difíciles de evaluar únicamente mediante enfoques volumétricos del calor almacenado, especialmente en sistemas caldéricos jóvenes donde la permeabilidad y la compartimentalización estructural pueden condicionar la distribución del recurso explotable. Este artículo corto presenta una línea de investigación en desarrollo orientada a la implementación de simulaciones termo-hidráulicas tridimensionales del Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB), Catamarca, Argentina. Cerro Blanco constituye uno de los objetivos geotérmicos más relevantes de la Puna Austral, con volcanismo silícico reciente, manifestaciones hidrotermales activas y evaluaciones previas que sugieren un potencial geotermoeléctrico significativo. El flujo de trabajo propuesto integra restricciones geológicas, estructurales, geoquímicas y geofísicas en un modelo numérico 3D implementado con GOLEM, desarrollado sobre la plataforma MOOSE para procesos térmico-hidráulicos acoplados en rocas fracturadas. Actualmente se dispone de una primera geometría geológica, una parametrización física preliminar y corridas exploratorias iniciales. El principal desafío metodológico es optimizar la resolución de malla, el particionado del dominio y la configuración numérica para hacer factibles simulaciones de alta resolución en entornos HPC. Los resultados esperados incluyen un flujo de trabajo reproducible, criterios de discretización refinados para zonas estructuralmente complejas y una base para futuras simulaciones predictivas de flujo de calor y fluidos en sistemas geotérmicos volcánicos.

Keywords: energía geotérmica , modelado termo-hidráulico , Cerro Blanco , GOLEM , MOOSE , HPC

1 Introducción y motivación

La energía geotérmica constituye un recurso estratégico para la transición energética debido a su carácter renovable y continuo (Bertani, 2016; Lu, 2018). La experiencia de Cerro Pabellón, Chile, demuestra la viabilidad de la generación geotermoeléctrica en ambientes volcánicos de altura en la región (Morata & Arancibia, 2025).

En el noroeste argentino, el Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB) en Catamarca representa un caso de estudio especialmente relevante: sistema caldérico

silficio joven con actividad pleistocena superior–holocena, manifestaciones hidrotermales activas y un potencial geotermoeléctrico estimado de 6–32 MWe (Báez et al., 2015; Barcelona et al., 2023; Chiodi et al., 2019).

Las metodologías volumétricas tradicionales de estimación de recursos son útiles en exploración temprana, pero presentan limitaciones para representar la arquitectura estructural, los contrastes litológicos y la circulación de fluidos que condicionan la distribución del recurso (Deb et al., 2021; Garg & Combs, 2015; Giordano et al., 2014). Este trabajo presenta el planteo metodológico y el estado actual de una línea de simulación termo-hidráulica 3D orientada a consolidar un flujo de trabajo computacional capaz de representar la circulación de fluidos y la transferencia de calor en el CVCB.

2 Enfoque metodológico

El modelo en desarrollo se implementa con GOLEM, una herramienta de modelado numérico paralela y flexible para procesos térmicos, hidráulicos y mecánicos acoplados en rocas fracturadas (Cacace & Jacquy, 2017). GOLEM se desarrolla sobre MOOSE, una plataforma multifísica orientada a simulaciones masivamente paralelas y a la implementación de formulaciones de elementos finitos en entornos de alto desempeño (Permann et al., 2020). Esta combinación permite abordar problemas tridimensionales con geometrías complejas, propiedades heterogéneas y acoplamiento entre transporte de calor y flujo de fluidos.

El flujo de trabajo parte de una geometría geológica 3D simplificada del CVCB que incorpora unidades litológicas principales, espesores de capas y estructuras relevantes, incluyendo fallas y la arquitectura caldérica. Sobre esta base se asignan propiedades físicas preliminares y se definen condiciones de borde térmicas e hidráulicas consistentes con la escala del dominio.

El dominio se discretiza en una malla hexaédrica generada a partir de superficies geológicas y topográficas. En los ensayos con aporte magmático, la cámara se incorpora como un cuerpo elipsoidal a $-2\,000$ m de profundidad, tratado como condición térmica inicial de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin fuente sostenida. La temperatura superficial es de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, la presión en el borde superior de 0.1 MPa y el flujo térmico basal de 70 mW m^{-2} .

La optimización de la discretización es un aspecto crítico: los enfoques de refinamiento adaptativo permiten concentrar resolución en regiones clave sin multiplicar innecesariamente los grados de libertad (Permann et al., 2020). Las corridas exploratorias muestran que el problema es sensible a la memoria disponible: una corrida TH sin cámara (4 procesos MPI, malla base de $4\,032\,111$ nodos y $3\,779\,328$ elementos) alcanzó consumos del orden de 15.5 GB y completó cinco pasos transitorios de dos años cada uno sin problemas de convergencia.

3 Estado actual y próximos pasos

El trabajo se encuentra en una etapa metodológica inicial, por lo que no se presentan conclusiones definitivas sobre la arquitectura hidrotermal ni sobre la

Table 1. Parámetros principales de la configuración numérica actualmente implementada en el workflow.

Parámetro	Valor usado en la configuración vigente
Extensión del dominio	~ 47 km (E-O) $\times$ 41 km (N-S) $\times$ 14 km (profundidad)
Profundidades de interfaces	200, 800, 1500, 3500, 6500, 10 000 y 14 000 m bajo la topografía
Malla	4 032 111 nodos y 3 779 328 elementos hexaédricos
Fluido	$\rho_f = 1000$ kg m $^{-3}$, $\mu = 10^{-3}$ Pa s, $c_f = 4000$ J kg $^{-1}$ K $^{-1}$, $\lambda_f = 0.65$ W m $^{-1}$ K $^{-1}$
Sólido	$\rho_s = 2700$ kg m $^{-3}$, $c_s = 900$ J kg $^{-1}$ K $^{-1}$
Condiciones de borde	$T_{sup} = 18$ °C, $p_{sup} = 0.1$ MPa, $q_b = 70$ mW m $^{-2}$

capacidad explotable del sistema. Los avances alcanzados son tres. Primero, se consolidó una geometría 3D de referencia que integra información disponible del CVCB (Figura 1a). Segundo, se implementó una parametrización física preliminar para explorar la respuesta térmica e hidráulica del dominio (Tabla 1). Tercero, las corridas exploratorias permitieron identificar el principal cuello de botella: el balance entre resolución espacial y costo computacional (Figura 1b).

Una malla demasiado gruesa suaviza gradientes y representa deficientemente fallas y contactos; una malla uniformemente fina incrementa tiempos de ejecución y consumo de memoria. En consecuencia, la estrategia de trabajo se orienta a combinar refinamiento local en zonas críticas con particionado eficiente para ejecución en HPC. Esta conclusión preliminar es metodológicamente relevante porque desplaza el foco desde la construcción conceptual del modelo hacia su implementación numérica robusta y reproducible.

Las próximas etapas apuntan a refinar la geometría 3D en zonas de falla y contactos litológicos, definir criterios de refinamiento local en sectores de alto gradiente térmico, optimizar el particionado y la configuración HPC, y consolidar un flujo de trabajo transferible a otros prospectos volcánicos de la Puna.

4 Conclusiones preliminares

El modelado termo-hidráulico 3D del CVCB constituye una línea de investigación en desarrollo orientada a superar las limitaciones de las estimaciones volumétricas tradicionales, avanzando hacia una representación explícita de la geometría geológica, la heterogeneidad de propiedades, la arquitectura estructural y la circulación de fluidos. Los avances actuales, con una primera geometría, parametrización preliminar y corridas exploratorias en GOLEM/MOOSE, indican que optimizar la resolución espacial y el particionado del dominio es la

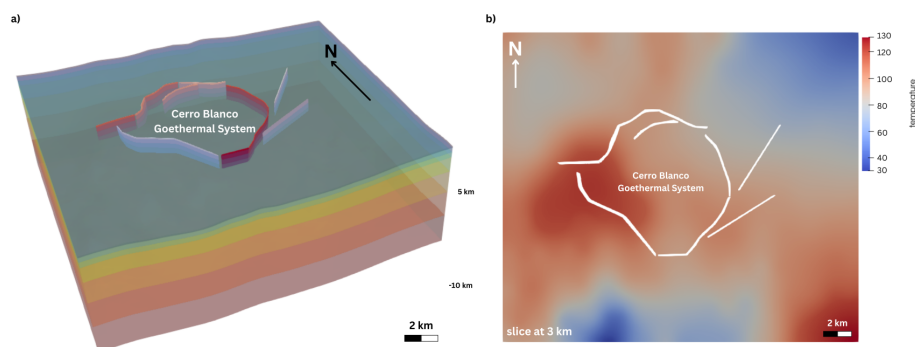


Fig. 1. a) Modelo geológico 3D simplificado del dominio utilizado para las simulaciones termohidráulicas del sistema geotérmico Cerro Blanco, mostrando la geometría de las fallas principales y los espesores de las capas. b) Distribución de temperatura en planta para una sección horizontal a 3 km de profundidad, donde se observa la variación espacial del campo térmico en torno al sistema geotérmico Cerro Blanco. Las líneas blancas representan las principales estructuras incorporadas en el modelo.

condición necesaria para extraer conclusiones hidrotermales cuantitativas. La contribución esperada es consolidar una metodología reproducible y transferible para simulaciones termo-hidráulicas 3D de sistemas geotérmicos volcánicos complejos.

Agradecimientos Este trabajo se desarrolla en el marco de líneas de investigación del Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe, IDEAN, UBA-CONICET) y de colaboraciones con grupos especializados en volcanología, geotermia, geología estructural, geofísica, hidrogeología y modelado numérico.

Declaración de intereses Los autores declaran no tener conflictos de interés relevantes para el contenido de este artículo.

Uso de herramientas de IA Los autores utilizaron OpenAI Codex para mejorar redacción y legibilidad y aplicar correcciones editoriales; revisaron el contenido resultante y asumen plena responsabilidad por la publicación.

References

- Báez, W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortiz-Yañes, A., Viramonte, J. G., Bustos, E., Giordano, G., & López, J. F. (2015). Estratigrafía y evolución del complejo volcánico cerro blanco, puna austral, argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 29–49.
- Barcelona, H., Chiodi, A., Yagupsky, D., Peri, G., Winocur, D., & Kleiman, P. (2023). Resource assessment of the cerro blanco geothermal system. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104247.

- Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 60, 31–43.
- Cacace, M., & Jacquey, A. B. (2017). Flexible parallel implicit modelling of coupled thermal–hydraulic–mechanical processes in fractured rocks. *Solid Earth*, 8, 921–941.
- Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Filipovich, R., Bustos, E., Galli, M. G., & Vaselli, O. (2019). Preliminary conceptual model of the cerro blanco caldera-hosted geothermal system (southern puna, argentina): Inferences from geochemical investigations. *Journal of South American Earth Sciences*, 94, 102213.
- Deb, P., Giordano, G., Shi, X., Lucci, F., & Clauser, C. (2021). An approach to reconstruct the thermal history in active magmatic systems: Implications for the los humeros volcanic complex, mexico. *Geothermics*, 96, 102162.
- Garg, S. K., & Combs, J. (2015). A reformulation of usgs volumetric “heat in place” resource estimation method. *Geothermics*, 55, 150–158.
- Giordano, G., De Benedetti, A. A., Bonamico, A., Ramazzotti, P., & Mattei, M. (2014). Incorporating surface indicators of reservoir permeability into reservoir volume calculations: Application to the colli albani caldera and the central italy geothermal province. *Earth-Science Reviews*, 128, 75–92.
- Lu, S. M. (2018). A global review of enhanced geothermal systems (egs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2902–2921.
- Morata, D., & Arancibia, G. (2025). Geothermal power plants at high altitude: The chilean experience. In R. DiPippo (Ed.), *Geothermal power generation* (pp. 809–837). Elsevier.
- Permann, C. J., Gaston, D. R., Andrš, D., Carlsen, R. W., Kong, F., Lindsay, A. D., Miller, J. M., Peterson, J. W., Slaughter, A. E., Stogner, R. H., & Martineau, R. C. (2020). Moose: Enabling massively parallel multi-physics simulation. *SoftwareX*, 11, 100430.