

Influencia de la geología de la corteza en el emplazamiento y propagación de intrusiones magmáticas y en las señales de deformación en superficie

Matías Clunes¹, John Browning^{1,2,3}, Carlos Marquardt³, Kyriaky Drymoni⁴, Agust Gudmundsson⁵, Janine Kavanagh⁶

¹ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile - mclunes@uc.cl

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

³ Departamento de Ingeniería en Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

⁴ Departamento de Ciencias de la Tierra y Medioambiente, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milán, Italia

⁵ Departamento de Ciencias de la Tierra, Royal Holloway University of London, Londres, Reino Unido

⁶ Escuela de Ciencias Medioambientales, University of Liverpool, Liverpool, Reino Unido

Palabras clave: deformación, volcanes, magmatismo

INTRODUCCIÓN

Para que se formen cámaras magmáticas o para que ocurran erupciones volcánicas, el magma debe propagarse a través de la corteza en forma de diques, intrusiones inclinadas o sills. La mayoría de los modelos que investigan las trayectorias del magma asumen que la corteza es homogénea (Kiyoo, 1958); Okada y Yamamoto, 1991) o estratificada horizontalmente, a menudo compuesta por rocas con contrastes en sus propiedades mecánicas (e.g., Masterlark, 2007). En regiones que han experimentado orogénesis, como en Los Andes, la corteza que constituye el basamento de los volcanes ha sido deformada durante millones de años, resultando en capas de roca plegadas y con fuerte inclinación. Incluso en ambientes extensionales, las capas de roca que componen la corteza presentan cierta inclinación, aunque a un menor ángulo. Esta característica también se puede observar en edificios volcánicos, como los estratovolcanes, formados por capas de depósitos con pendientes de hasta 40°, o en calderas por la acción de fallas. La suposición de propiedades homogéneas o estratificación horizontal, entonces, no comprende todas las potenciales interacciones entre el magma y la corteza. De manera adicional, estos procesos pueden generar cambios en la cantidad y el estilo de deformación en superficie registradas durante episodios de actividad volcánica, con relevantes implicancias para el monitoreo volcánico y las interpretaciones realizadas sobre las características de la fuente de la deformación.

METODOLOGÍA

En nuestra investigación (Clunes et al., 2021; Clunes et al., 2022) combinamos observaciones de terreno de intrusiones emplazadas en secuencias de roca inclinadas a distintos ángulos con modelos numéricos a través de la metodología de los Elementos Finitos (FEM) en el software COMSOL Multiphysics 5.4 para explorar las interacciones entre capas de roca inclinadas, trayectorias del magma y la deformación en superficie asociada a dichas intrusiones. Las intrusiones son modeladas como cavidades elípticas con dimensiones obtenidas a partir de observaciones de terreno y una presión P_0 (overpressure) asignada de 5 MPa. Dichas cavidades están emplazadas en un dominio computacional con comportamiento elástico, en el que se simulan las geometrías corticales y sus propiedades mecánicas (Módulo de Young y coeficiente de Poisson). El tamaño del dominio modelado debe ser lo suficientemente grande para evitar efectos de borde. El borde superior del dominio, equivalente a la superficie terrestre, es modelado como una superficie libre, mientras que los otros bordes se consideran fijos, para evitar traslaciones y rotaciones durante el modelamiento.

Sill El Juncal

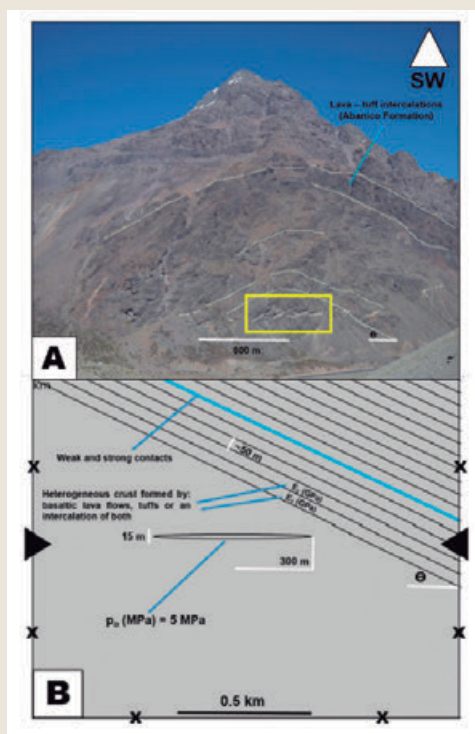
En primer lugar, realizamos modelos FEM con datos de terreno de un sill riódacítico emplazado en el núcleo de un pliegue anticlinal en Los Andes de Chile Central (Fig. 1), en rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación banico del Eoceno-Mioceno (Piquer et

al., 2015) (Cooke et al., 2019). La geometría de la intrusión en forma de segmentos en "echelon" ha sido interpretada previamente como una serie de estructuras dilatacionales generadas por procesos tectónicos durante la intrusión, asociadas a la actividad de la falla Alto del Juncal (Piquer et al., 2015). Montecinos et al. (2008) obtuvo una edad U-Pb en circón de 11.53 ± 0.19 Ma en intrusiones similares ubicadas al noreste. El acortamiento observado en la Cordillera Principal de Los Andes de Chile Central entre el Oligoceno-Mioceno Temprano, hace 25-22 Ma y continúa hasta el presente (Charrier et al., 2002; Carrizo & Herrera, 2019; Piquer et al., 2019; Cooke et al., 2021).

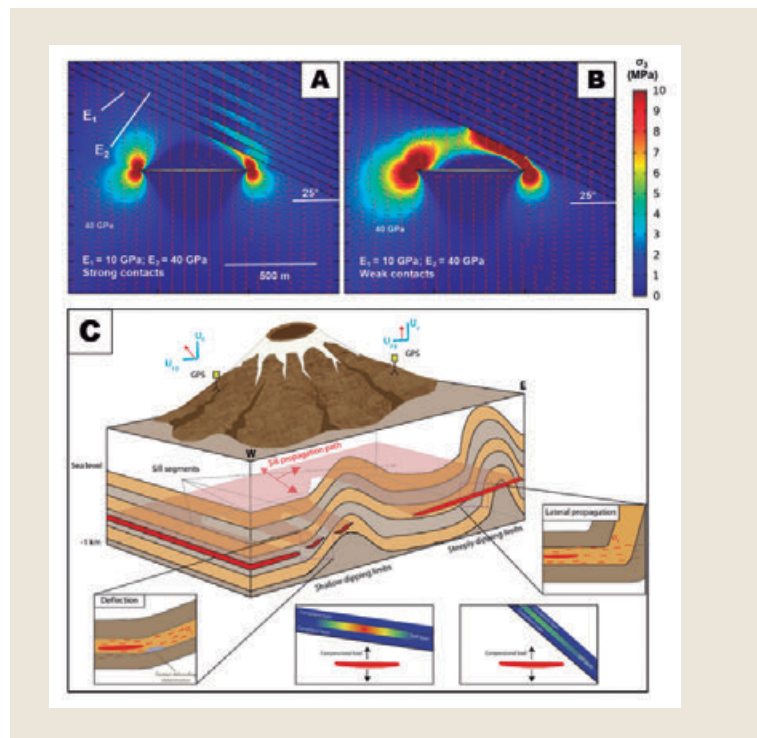
Los resultados de los modelos muestran que, tanto las propiedades mecánicas de las capas que conforman la roca caja, como las de los contactos entre ellas y su geometría, juegan un rol importante en la propagación y emplazamiento de magma a niveles

superficiales (Fig. 2). La propagación y emplazamiento de sills en segmentos corticales heterogéneos y anisotrópicos modifican el campo de esfuerzos, promoviendo la propagación lateral, el cese de la propagación o generando cambios en la dirección de propagación de la intrusión.

Específicamente, observamos que los sills presentan mayor tendencia a cambiar su dirección de propagación al encontrarse en su trayectoria con capas de roca inclinadas a bajos ángulos, respecto de lo que ocurre con rocas inclinadas a altos ángulos. Los contactos entre las capas de roca mecánicamente débiles, por su parte, favorecen el cambio de la dirección de propagación debido a la rotación de esfuerzos, efecto que es atenuado cuando las capas de roca están inclinadas a mayores ángulos.



► Fig. 1 - A) Sill riódacítico emplazado en el núcleo de un pliegue anticlinal formado por una intercalación de lavas basálticas a andesíticas y tobas en la localidad de El Juncal. B) Configuración del modelo FEM 2D generado en COMSOL Multiphysics, donde θ representa la inclinación del limbo del pliegue.



► Fig. 2 - Figura A) y B) Modelos FEM de esfuerzos alrededor del sill cerca de una secuencia de rocas heterogénea ($E_1 < E_2$) e inclinadas a 25° alejándose de la intrusión. Las flechas rojas indican las trayectorias del esfuerzo principal mayor (σ_1) y los contornos de colores, el esfuerzo principal menor (σ_3) o tensión máxima. En A) los contactos entre las capas son modelados como resistentes mecánicamente, mientras que en B) como débiles. C) Esquema de las posibles trayectorias de propagación de un sill y los mecanismos asociados, emplazado en una corteza plegada que subyace a un volcán activo.

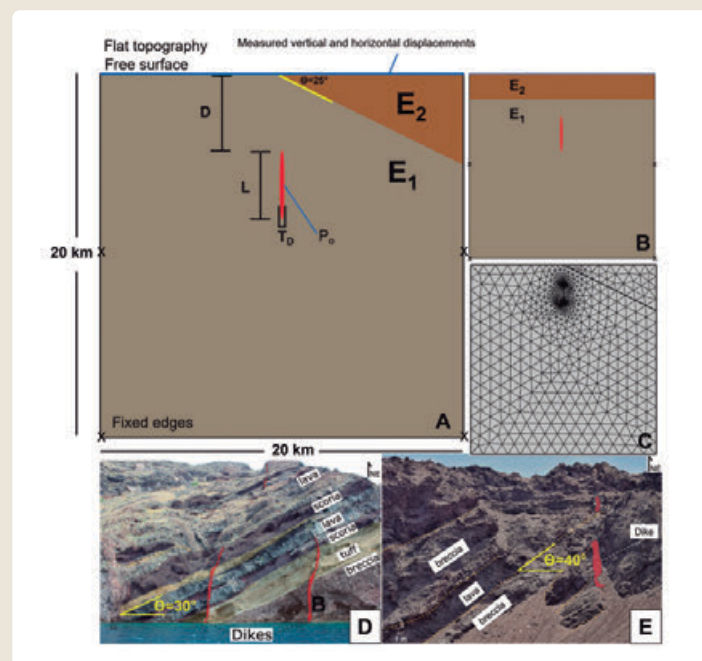
Estas observaciones demuestran que, para generar las geometrías observadas en el sill de El Juncal, no se requieren complejas estructuras de cizalle generadas por procesos tectónicos, sino que se pueden explicar a través de las interacciones de la intrusión con la roca caja. Lo anterior también resuelve un problema de escala temporal que conlleva la interpretación "sintectónica" del origen de las geometrías observadas en sill de El Juncal, puesto que la deformación relacionada al plegamiento ocurre durante miles o millones de años, mientras que el enfriamiento de diques o sills toman del orden de meses a años (Carslaw y Jaeger, 1959; Gudmundsson, 2020).

Deformación en superficie

Una vez establecida la influencia de las capas inclinadas y sus propiedades mecánicas en la propagación y emplazamiento del magma, evaluamos las implicancias de estas interacciones en la deformación superficial generada durante periodos de actividad volcánica. Para este efecto, basándonos en observaciones de terreno, simulamos distintos

escenarios de diques emplazados en secuencias de rocas heterogéneas inclinadas a diferentes ángulos en modelos FEM (Fig. 3), con el objetivo de comparar las deformaciones generadas en superficie, tanto verticales (Fig. 4), como horizontales (Fig. 5) con aquellas observadas bajo el supuesto de una corteza homogénea o estratificada horizontalmente.

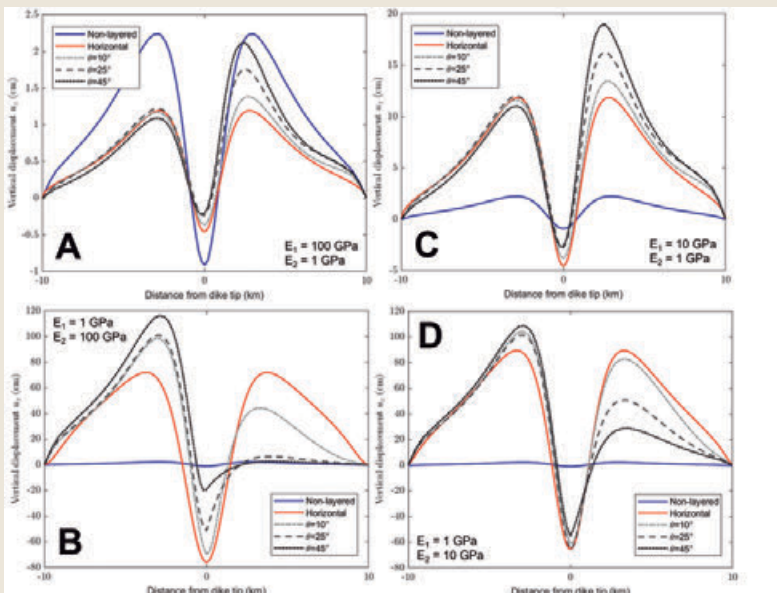
Nuestros resultados muestran que la inclinación de las capas de roca de la corteza puede producir localmente deformaciones en superficie que pueden ser hasta 30 veces mayores que las observadas en modelos que consideran una corteza homogénea, dependiendo del ángulo de inclinación de las capas y del contraste de rigidez (stiffness) entre las rocas que hospedan a la intrusión y las que son adyacentes a ella (Fig. 6). Observamos, además, que las señales de deformación resultantes exhiben máximos ubicados hasta 1.4 km de distancia de los esperados en modelos homogéneos y con patrones asimétricos, similares a aquellos observados en modelos numéricos y análogos durante intrusiones inclinadas (Kavanagh et al., 2018; Bazargan y Gudmundsson, 2020).



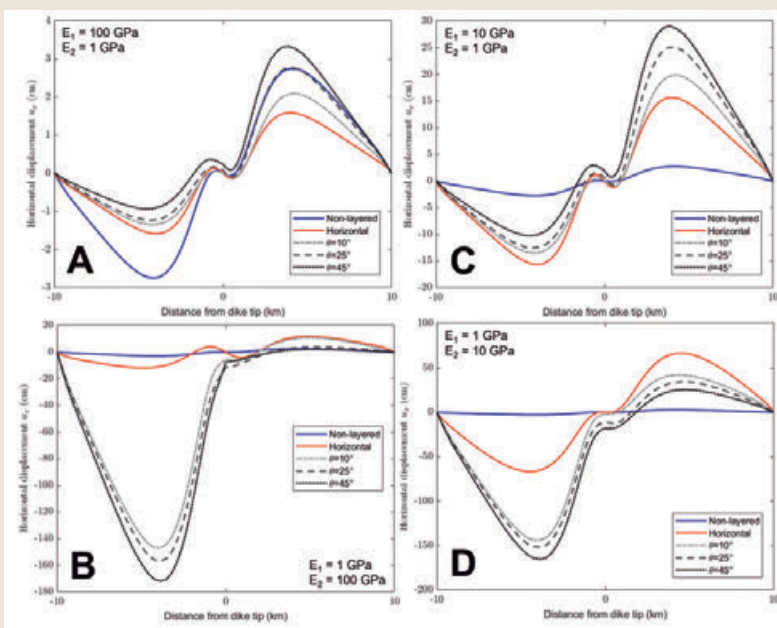
► Fig. 3 – A) Configuración de los modelos FEM para las distintas inclinaciones testeadas (L: longitud del dique, TD: espesor del dique, D: profundidad del extremo superior del dique, Po: sobrepresurización magmática u overpressure, θ : inclinación de la capa superior, E1-E2: variación del Módulo de Young de las capas. B) Configuración del modelo FEM estratificado horizontalmente. C) Ejemplo del mallado del modelamiento para la capa superior inclinada 25°. D) y E) Fotografías de terreno de diques emplazados en unidades de roca inclinadas a distintos ángulos, de la caldera en Santorini (D) y la Formación Farellones en Los Andes de Chile Central (E).

CONCLUSIONES

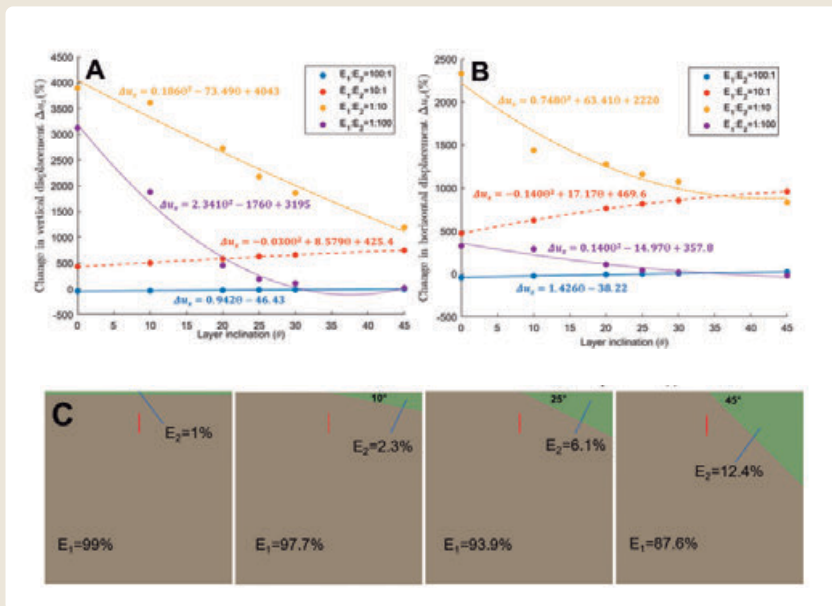
Nuestras observaciones destacan la importancia de considerar la geometría y las propiedades mecánicas de las rocas en las cuales el magma intruye durante el modelamiento de procesos magmáticos, puesto que influyen considerablemente en los procesos de propagación y emplazamiento del magma, controlando las trayectorias y la geometría resultante. Así como también en las señales de deformación observadas en superficie, las que pueden ser similares para intrusiones verticales o inclinadas, dependiendo de la presencia de rocas inclinadas con contrastes de rigidez en la corteza a través de la cual el magma se propaga. Los resultados aquí expuestos demuestran que para cualquier estudio que busque invertir las deformaciones observadas en superficie para determinar la geometría y profundidad de la fuente de la deformación, es necesario establecer, de la mejor manera posible, las propiedades mecánicas y la actitud de las unidades de roca que constituyen la geología bajo volcanes activos, especialmente el ángulo de inclinación.



► Fig. 4 – Variaciones en la deformación vertical en superficie (u_y) relativas a la distancia lateral desde la intrusión (dique de 2 km de longitud emplazado a 2 km de profundidad) para cada inclinación y contraste de rigidez testados en los modelos FEM.



► Fig. 5 – Variaciones en la deformación horizontal en superficie (u_x) relativas a la distancia lateral desde la intrusión (dique de 2 km de longitud emplazado a 2 km de profundidad) para cada inclinación y contraste de rigidez testados en los modelos FEM.



► Fig. 6 – Cambios en los desplazamientos verticales (A) y horizontales (B) en porcentaje respecto de los modelos que asumen una corteza homogénea, para cada inclinación (θ) y contraste de rigidez testeados ($E_1:E_2$)

REFERENCIAS

- Bazargan, M., & Gudmundsson, A. (2020). Stresses and displacements in layered rocks induced by inclined (cone) sheets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 106965.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*, Clarendon.
- 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.
- Clunes, M., Browning, J., Cembrano, J., Marquardt, C., & Gudmundsson, A. (2021). Crustal folds alter local stress fields as demonstrated by magma sheet–Fold interactions in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 570, 117080.
- Clunes, M., Browning, J., Marquardt, C., Cortez, J., Drymoni, K., & Kavanagh, J. L. (2022). Inclination and heterogeneity of layered geological sequences influence dike-induced ground deformation.
- Gudmundsson, A. (2020). *Volcanotectonics: Understanding the structure, deformation and dynamics of volcanoes*. Cambridge University Press.
- Kavanagh, J. L., Burns, A. J., Hazim, S. H., Wood, E. P., Martin, S. A., Hignett, S., & Dennis, D. J. (2018). Modelos desafiantes de ascenso de diques utilizando experimentos de laboratorio novedosos: Implicaciones para reinterpretar evidencia de ascenso de magma y vulcanismo. *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica*, 354, 87-101.
- Masterlark, T. (2007). Magma intrusion and deformation predictions: Sensitivities to the Mogi assumptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6).

- ▶ Kiyoo, M. O. G. I. (1958). Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq Res Inst*, 36, 99-134.
- ▶ Montecinos, P., Schärer, U., Vergara, M., & Aguirre, L. (2008). Lithospheric origin of Oligocene-Miocene magmatism in Central Chile: U-Pb ages and Sr-Pb-Hf isotope composition of minerals. *Journal of Petrology*, 49(3), 555-580.
- ▶ Okada, Y., & Yamamoto, E. (1991). Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B6), 10361-10376.
- ▶ Piquer, J., Skarmeta, J., & Cooke, D. R. (2015). Structural evolution of the Rio Blanco-Los Bronces District, Andes of Central Chile: controls on stratigraphy, magmatism, and mineralization. *Economic Geology*, 110(8), 1995-2023.
- ▶ Cooke, D. R., Rivera, O., Piquer, J., & Yáñez, G. (2019). Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. *Andean Geology*, 46(2), 223-239.
- ▶ Piquer, J., Sanchez-Alfaro, P., & Pérez-Flores, P. (2021). A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation. *Geology*, 49(5), 597-601.
- ▶ Carrizo, G. Y., & Herrera, O. R. (2019). Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 51-66.