

INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA REGIONAL SOBRE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA HIDROTHERMAL EN EL VOLCÁN TICSANI - SUR DE PERÚ

D. Ramos^a, S. Byrdina^b, J. Vandemeulebrouck^b, P. Masias^a, A. Revil^{b,c}, A. Finizola^d,
Y. Antayhua^a, I. Lazarte^a.

^a INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Av. Dolores, Urb. Las Begonias B-3, J. L. B y Rivero, Arequipa, Perú. dramos@ingemmet.gob.pe.

^b ISTerre, Université de Savoie, Equipe Géophysique des Volcans, IRDR219, CNRS, UMR5559, F-73376 Bourget du Lac, France.

^c Colorado School of Mines, Department of Geophysics, Golden, CO80401, USA.

^d Laboratoire GéoSciences Réunion, Université de la Réunion, Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris-Cité, CNRS UMR 7154, Saint-Denis, La Réunion, Indian Ocean, France.

INTRODUCCIÓN

Los volcanes activos están asociados a sistemas hidrotermales que pueden ser identificados por: la actividad fumarólica, las fuentes termales próximas al volcán, la alta conductividad eléctrica en profundidad, y por anomalías de potencial espontáneo (PE) en la superficie (Aizawa, 2008; Bedrosian et al, 2007; Aizawa et al, 2009 a, b; Revil et al, 2011).

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la topografía regional y la permeabilidad del edificio en la geometría del cuerpo hidrotermal definido por la presencia de aguas termales en el volcán Ticsani. Para tal fin, se han analizado datos de campo de PE, temperatura del suelo y datos de simulación numérica de acoplamiento de masas y la transferencia de calor en el interior del edificio volcánico. La idea básica es que hay un control del flujo de agua subterránea por la topografía, que a su vez controla la transferencia de calor por advección desde la fuente magmática.

EL VOLCÁN TICSANI

El Ticsani (16°45'18"S 70°35'43"O 5408 msnm) es un complejo de domos de lava dacítico situado en la Zona Volcánica Central, en el sur de Perú (Fig. 1). Este volcán junto con los volcanes Ubinas y Huaynaputina, son considerados como un solo grupo volcánico debido a su ubicación fuera del arco principal (Lavallé et al., 2009), en el entorno de los principales sistemas de fallas regionales: sistema de fallas de desplazamiento de rumbo NW-SE, asociado al arco principal, y fallas normales N-S relacionadas al Graben de Río Tambo (Lavallé et al., 2009).

En el 2005, se produjo un enjambre sísmico cerca del volcán Ticsani con un sismo principal de $M_w = 5.8$ asociado a una falla normal, ubicado cerca a la cumbre del Ticsani, y a una profundidad de 4 km (Holtkamp et al., 2011). La ubicación de estos sismos debajo del edificio Ticsani y cerca de las fuentes termales del Río Putina (Fig. 1) estaría asociada con la actividad del sistema hidrotermal.

TRABAJOS DE CAMPO

Se realizaron 5,751 mediciones de PE (o SP) con un paso de muestreo de 25 m en el volcán Ticsani, a lo largo de dieciséis perfiles radiales y un perfil periférico que rodea el edificio volcánico. Con estos datos se confeccionó un mapa que representa la distribución del PE en el volcán Ticsani. La distribución de PE muestra una anomalía dipolar clásica con un lóbulo positivo (250 mV) alrededor del domo más joven (Ti), y los lóbulos negativos en las partes de los flancos y en los domos más antiguos D1 y D3. Las anomalías negativas alcanzan 3.400 mV al sur del volcán. Además, en el sector NW se observan valores medios de 1,000 mV mayores que en el sector SW del volcán.

La temperatura del suelo se midió con un termómetro digital, cada 50 m a lo largo de un perfil circular y cuatro perfiles radiales que cruzan el edificio volcánico (Fig. 3). Se observa altas temperaturas del suelo ($T > 14^\circ \text{C}$) a unos 10 km al W-NW de la cumbre, donde se encuentran la mayoría de las fuentes termales (Fig. 2), mientras que los otros flancos presentan baja temperatura de suelo ($T \leq 10^\circ \text{C}$). En el área de la cumbre, existen dos fumarolas.

Estos datos sugieren la existencia de un sistema hidrotermal en la cumbre del edificio de Ticsani.

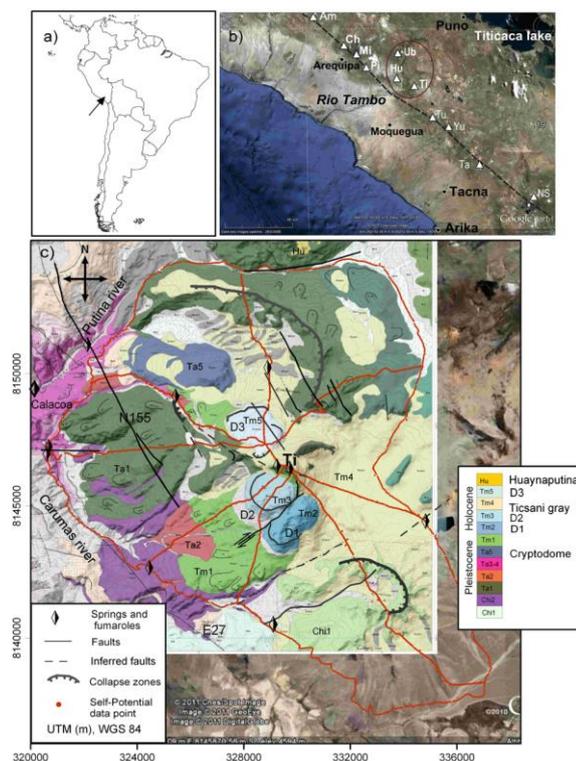


Fig. 1. Ubicación del área de estudio y mapa geológico del volcán Ticsani (modificado de Mariño, 2002).

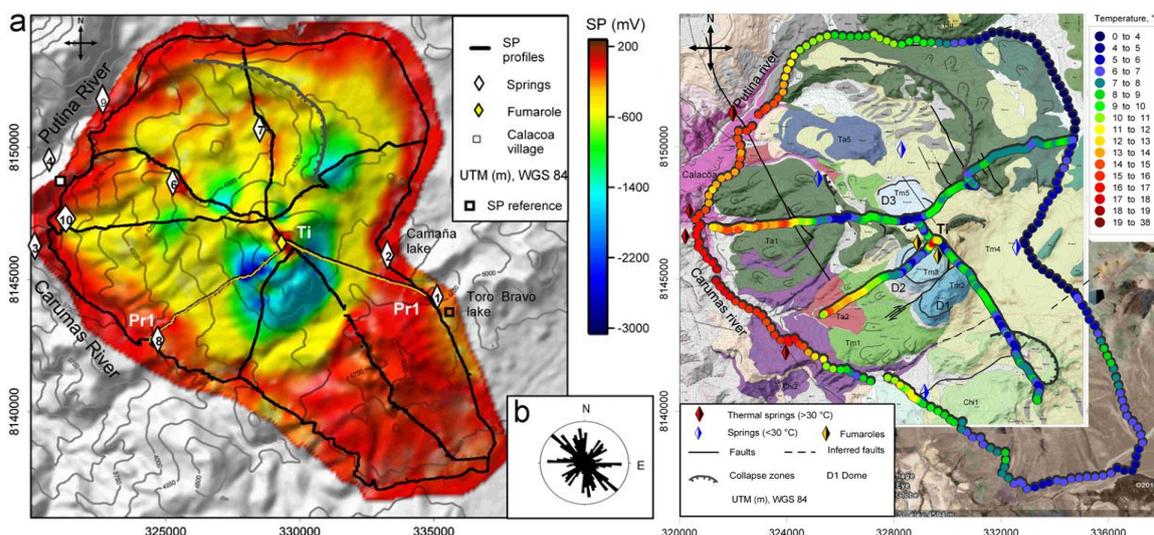


Fig. 2. Modelo digital del terreno y resultados del estudio de PE. Donde los valores PE máximos y mínimos están asociados a los sistemas hidrotermal e hidrogeológico respectivamente.

Fig. 3. Temperatura del suelo. Mediciones hechas con un termómetro digital tipo T-bar con 0.1°C de precisión.

MODELIZACIÓN TÉRMICA DEL VOLCÁN TICSANI

Se empleó un modelo 2-D de tres unidades y el software COMSOL Multiphysics V3.5 para analizar el transporte combinado de agua y calor (Fig. 4 y 5) y un código de post-procesamiento para la resolución de la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico. Este modelo considera las siguientes condiciones de contorno: una presión hidrostática en ambos lados del sistema, una presión de fluido hidrostáticos en la parte inferior del sistema y un flujo de agua constante en la superficie

correspondiente a la recarga meteórica efectiva. Además se considera, la precipitación anual típica superficial de 300 mm (Pouyaud et al., 2001), y la recarga eficaz de agua, dada por el 50% de la precipitación anual (Ingebritsen et al., 1992). La ubicación del nivel freático en los extremos del perfil Pr1 está dada por las fuentes termales (3700 msnm) y la laguna Toro Bravo (4600 msnm). Este modelo fue corrido para diferentes valores de permeabilidad (k_0):

Modelo A: $k_0 = 4 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, la transferencia de calor difusivo domina sobre la advección incluso a poca profundidad y el cono está casi completamente saturado.

Modelo B: $k_0 = 8 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, el flujo térmico se deriva hacia la parte inferior del flanco W, llegando a la superficie. La anomalía térmica llega a más de 10 km de la cima del volcán, según la ubicación de las fuentes termales. La anomalía térmica de la cumbre es distinta según las mediciones de T° del suelo y la posición del nivel freático dado por los datos de PE.

Modelo C: $k_0 = 8 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (permeabilidad superficial), el cono es desaturado. El flujo térmico se dirige casi verticalmente hacia la cumbre.

Se observa que el mejor modelo obtenido es el B.

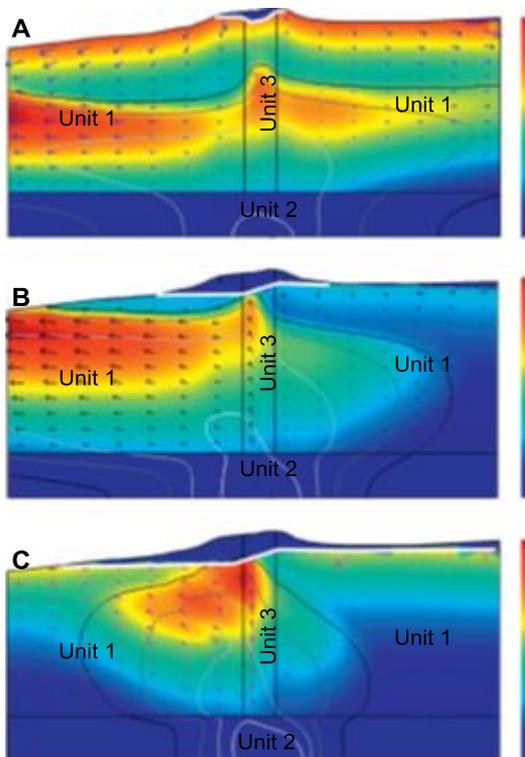


Fig. 4. Modelos para diferente permeabilidad.

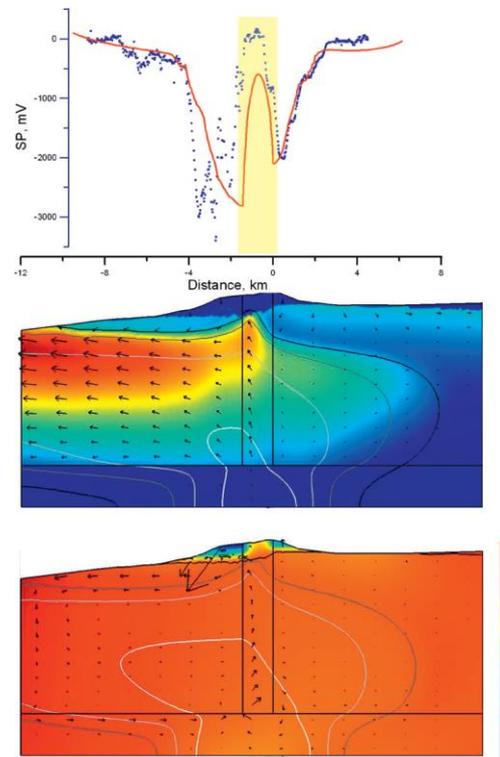


Fig. 5. Distribución de la conductividad hidráulica, temperatura, potencial eléctrico y conductividad eléctrica para el modelo B.

La Fig. 5 muestra (a) perfiles PE calculados (líneas de color rojo) y de campo (puntos azules); la zona de emisión de gas (rectángulo amarillo). (b) La conductividad hidráulica (color), la T° (contornos). (c) El potencial eléctrico (color), conductividad eléctrica (contorno) y densidad de corriente (flechas). Las variaciones de la conductividad eléctrica se deben a la saturación o a variaciones de T° . En condiciones de saturación total, la conductividad eléctrica se determina por la T° . En las laderas del domo, la disminución de la conductividad eléctrica se debe a la saturación parcial; y correspondería a una zona de alta resistividad (Finizola et al., 2004). Este modelo coincide bastante bien con las observaciones en el volcán, fuera de la zona de la cumbre.

CONCLUSIONES

Con el propósito de entender el emplazamiento del sistema hidrotermal del Ticsani, se ha considerado un modelo numérico 2-D de transferencia de masa y calor. El análisis sugiere que el gradiente topográfico regional es capaz de desviar considerablemente el flujo de agua termal. Las amplitudes de los lóbulos negativos en la anomalía de PE pueden evidenciar el flujo de agua en la región y se puede utilizar para limitar la permeabilidad en el área de la cumbre.

REFERENCIAS

1. Aizawa, K., 2008. Classification of self-potential anomalies on volcanoes and possible interpretations for their subsurface structure. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 175, 253–268.
2. Aizawa, K., Ogawa, Y., Ishido, T., 2009a. Ground water flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: delineation by electric self-potential and magnetotellurics. *J. Geophys. Res.* 114, B01208.
3. Aizawa, K., Ogawa, Y., Mishina, M., Takahashi, K., Nagaoka, S., Takagi, N., Sakanaka, S., Miura, T., 2009b. Structural controls on the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano: relationship between a shallow, electrically resistive body and the possible ascent route of magmatic fluid. *J. Volcano l. Geoth. Res.* 187, 131–139.
4. Bedrosian, P., Unsworth, M., Johnston, M. J. S., 2007. Hydrothermal circulation at Mount St. Helens determined by self-potential measurements. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 160, 137–146.
5. Finizola, A., Lénat, J. -F., Macedo, O., Ramos, D., Thouret, J., Sortino, F., 2004. Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 135, 343–360.
6. Holtkamp, S. G., Pritchard, M. E., Lohman, R. B., 2011. Earthquakes warm in South America. *Geophys. J. Int.* 187, 128–146.
7. Ingebritsen, S. E., Sherrod, D., Mariner, R., 1992. Rates and patterns of groundwater flow in the Cascade Range Volcanic arc, and the effect on subsurface temperature. *J. Geophys. Res.* 97, 4599–4627.
8. Lavallé, Y., deSilva, L. S., Salas, G., Byrnes, J. M., 2009. Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), Southern Peru. *J. Volcano l. Geoth. Res.* 186(4), 253–264.
9. Mariño, J., 2002. Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
10. Pouyaud, B., Yeren Suarez, J., Arboleda Orozco, J. F., Suarez Alayza, B., 2001. Variabilidad pluviométrica, a escalas anual y cuatrimestral, en la vertiente peruana del Océano Pacífico. SENAMHI-IRD.
11. Revil, A., Finizola, A., Ricci, T., Delcher, E., Peltier, A., Barde-Cabusson, S., Avaré, G., Bailly, T., Bennati, L., Byrdina, S., Colonge, J., Gangi, F. D., Douillet, G., Lupi, M., Letort, J., Tsang Hin Sun, E., 2011. Hydrogeology of Stromboli volcano, Aeolian Islands (Italy) from the interpretation of resistivity tomograms, self-potential, soil temperature and soil CO₂ concentration measurements. *Geophysics. J. Int.* 186, 1078–1094.