



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Estudio de la circulación de fluidos y estructura interna del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, inferida a partir de datos de potencial espontáneo

Puma N. ⁽¹⁾, Torres J. ⁽¹⁾, Lazarte I. ⁽¹⁾, Finizola A. ^(2,3)

¹ Instituto Geofísico del Perú

² Université de La Réunion, Laboratoire GéoSciences Réunion, F-97744 Saint Denis, France.

³ Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France.

RESUMEN

En el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca (CVASH), entre los años 2014-2019, se ha realizado un estudio de Potencial Espontáneo (PE), obteniendo 11,665 puntos de medida, con separación de 20 metros entre cada punto (233 km lineales). El objetivo de este estudio ha sido identificar los sistemas hidrotermales asociados a estos edificios, extensiones laterales y las estructuras internas, como los cambios de litología y zonas de circulación preferencial de fluidos. El mapa de PE obtenido muestra principalmente 3 anomalías bien definidas: 2 anomalías con un máximo de PE (A+ y S+) centradas en los volcanes Ampato y Sabancaya respectivamente, y otra anomalía con valores negativos de PE (H-), de forma elíptica, localizada a 7 km al noreste del volcán Hualca Hualca. Las 2 anomalías asociadas a máximos de PE están delimitadas lateralmente por un cambio entre gradiente PE/altitud positivo y negativo, que delimita la extensión lateral de ambos sistemas hidrotermales; es decir el cambio entre ascensos de fluidos localizados sobre las mayores fuentes de calor y sistema hidrogeológico con infiltración de agua de lluvia, alrededor de los volcanes. Los tamaños de estos sistemas hidrotermales son de ~6.3 x 4.7 km para el volcán Ampato y ~5.9 x 4.3 km para el Sabancaya. La anomalía asociada a un mínimo de PE está definida por un cambio de gradiente que delimita una forma elíp-

tica de ~8.6 x 6.1 km en la zona NE del Hualca Hualca. Esta anomalía H-, observada en dominio hidrogeológico del Hualca Hualca, posiblemente estaría asociada a la geometría subterránea del piso de una antigua caldera. La comparación de este límite estructural con la deformación de este complejo volcánico, estudiado por interferometría radar (Pritchard and Simons, 2002, 2004) muestra que el máximo de la deformación observado entre 1992 y 1996 se localiza geográficamente en el borde NO de esta caldera, mientras el lineamiento Sepina de dirección NE-SO, está cruzando el borde SE de esta misma caldera.

Los resultados de PE obtenidos a gran escala en la zona del CVASH sugieren una relación entre (1) el lineamiento Sepina de dirección NE-SO, (2) el centro principal de deformación que se ha observado en este sector, e interpretado por una fuente magmática localizada entre 15-18 km de profundidad (Pritchard and Simons, 2002, 2004) y el borde de una antigua caldera (~8.6 x 6.1 km) centrada a ~7 km al NE del Hualca Hualca.

Palabras claves: Potencial Espontáneo, Ampato, Sabancaya, Hualca Hualca, sistemas hidrotermales, límite de caldera, deformación.

Keywords: Self-potential, Ampato, Sabancaya, Hualca-Hualca, hydrothermal system, caldera boundary, deformation.

ABSTRACT

In the Ampato-Sabancaya-Hualca Volcanic Complex (CVASH), between the years 2014-2019, a study of Self-Potential (SP) has been carried out, obtaining 11,665 measurement points, with a step of 20 meters between each point (233 km linear). The objective of this study has been to identify the hydrothermal systems associated with these volcanic edifices, lateral extensions and internal structures, such as lithological changes and preferential fluid circulation zones. The SP map obtained shows mainly 3 well-defined anomalies: 2 anomalies with a SP maximum (A + and S +) centered on the Ampato and Sabancaya volcanoes respectively, and another anomaly with negative SP (H-) values, of elliptical shape, located 7 km northeast of the Hualca Hualca volcano. The 2 anomalies associated with SP maxima are laterally delimited by a change between positive and negative SP / altitude gradient, which delimits the lateral extent of both hydrothermal systems; that is, the change between rise of fluids localized over the major heat sources and the hydrogeological system with infiltration of rainwater, around the volcanoes. The sizes of these hydrothermal systems are $\sim 6.3 \times 4.7$ km for the Ampato vol-

cano and $\sim 5.9 \times 4.3$ km for the Sabancaya. The anomaly associated with a SP minimum is defined by a change of gradient that delimits an elliptical shape of $\sim 8.6 \times 6.1$ km in the NE zone of Hualca Hualca. This H- anomaly, observed in the hydrogeological domain of Hualca Hualca, could possibly be associated with the underground geometry of the floor of an old caldera. The comparison of this structural limit with the deformation of this volcanic complex, studied by radar interferometry (Pritchard and Simons, 2002, 2004) shows that the maximum of the deformation observed between 1992 and 1996 is geographically located on the NW edge of this caldera, while the Sepina lineament in a NE-SW direction is crossing the SE edge of this same caldera.

The large-scale SP results obtained in the CVASH zone suggest a relationship between (1) the lineamiento of Sepina the direction NE-SW, (2) the main center of deformation that has been observed in this sector, and interpreted by a magmatic source located between 15-18 km deep (Pritchard and Simons, 2002, 2004) and the border of an old caldera ($\sim 8.6 \times 6.1$ km) centered ~ 7 km NE of Hualca Hualca.

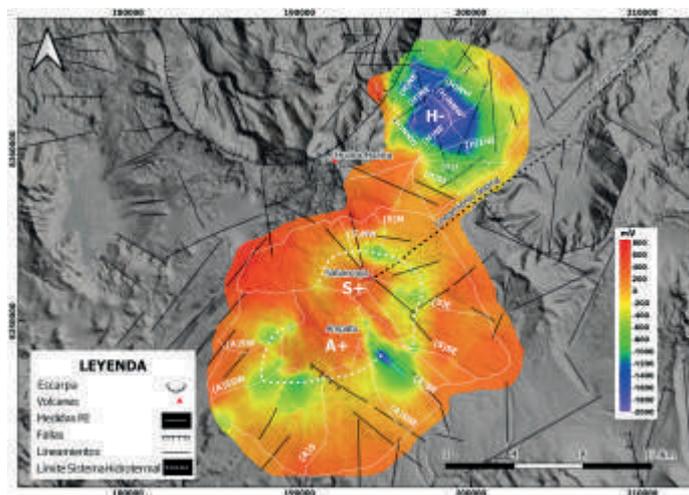


Figura 1. Mapa de PE del CVASH. Los sistemas de fallas y lineamientos son tomados de Huamán, 1995 y Sébrier et al. 1985.

MEDIDAS DE PE EN EL CVASH

Los datos de PE fueron adquiridos durante los años 2014-2019. Se midieron 11 665 puntos con 20 m de separación entre cada medida, equivalente a 233 km lineales.

Sobre el Sabancaya se han realizado 4 perfiles ra-

diales: (S)SE, (S)E, (S)N, y (S)NW y en el volcán Ampato se han realizado 5 perfiles radiales: (A)SE, (A)SSE, (A)S, (A)SSW, (A)SW. Finalmente, en la zona NE del Hualca Hualca se han realizado 9 perfiles que atraviesan una misma área, de los cuales 6 se consideran radiales: (H)SE, (H)E, (H)ENE, (H)NE, (H)NE' y (H)NE'', y 3 transversales (H)NNW, (H)NNW' y (H)NNW. A

continuación, se detallan las anomalías.

La anomalía S⁺ (Positivo), con gradiente SP/altitud positiva, de forma semicircular, se ubica en la cima del volcán Sabancaya, y se muestra ligeramente alargada en dirección NW-SE. Esta mide ~5.9 x 4.3 km y está comprendida entre los 4900 m s.n.m. y 5500 m s.n.m. Presenta un valor máximo de +315 mV (cima) y un valor mínimo de -843 mV (Fig. 1).

La anomalía A⁺ (Positivo), también con gradiente SP/altitud positivo, de forma elíptica, se ubica sobre el volcán Ampato y tiene una dimensión de ~6.3 x 4.7 km. Presenta valores de entre +411 mV en la cima y -1498 mV sobre el perfil (A)SE. El límite de la anomalía en la zona norte no está bien definido por la influencia del sistema hidrotermal del Sabancaya (Fig. 1).

La anomalía H⁻ (Negativo) se ubica en la zona NE del volcán Hualca Hualca y presenta un valor negativo de -2013 mV, valor más bajo en todo el proyecto. Dicha anomalía tiene una forma elíptica bien definida de dimensiones de ~8.6 x 6.1 km, alargada en dirección NO-SE (Fig. 1).

FORMACIONES GEOELÉCTRICAS SOBRE EL COMPLEJO VOLCANICO AMPATO SABANCAYA (CVAS).

El gradiente de PE o Coeficiente de electrofiltración (Ce) corresponde a la variación de PE (ΔV) respecto a la variación de la altura (Δh). El cambio de Ce permite delimitar variación lateral de litológicas presentes en el edificio volcánico entre la superficie y el acuífero en zona hidrogeológica o entre la superficie y la zona de ascenso de fluidos en zona hidrotermal (Finizola et al., 2004). En el CVAS se identificaron para cada edificio volcánico, 2 zonas: **1) Zona Hidrogeológica (Hz)** donde se distinguen hasta 5 horizontes geoelectricos distintos (Hz1, Hz2, Hz3, Hz4 y Hz5) (Fig. 2). **2) Zona Hidrotermal,** donde se distinguieron también hasta 5 horizontes geoelectricos distintos: 4 Zonas de Convección en la parte baja del edificio (LCz) para el volcán Sabancaya (LCz1, LCz2, LCz3 y LCz4) y 1 Zona de Convección en la parte alta del edificio (UCz). Para el volcán Ampato, solo se distinguieron 3 LCZ (LCz1, LCz2, LCz3) y ninguna UCz por dificultad de acceso en la parte alta correspondiendo al nevado (Fig. 2).

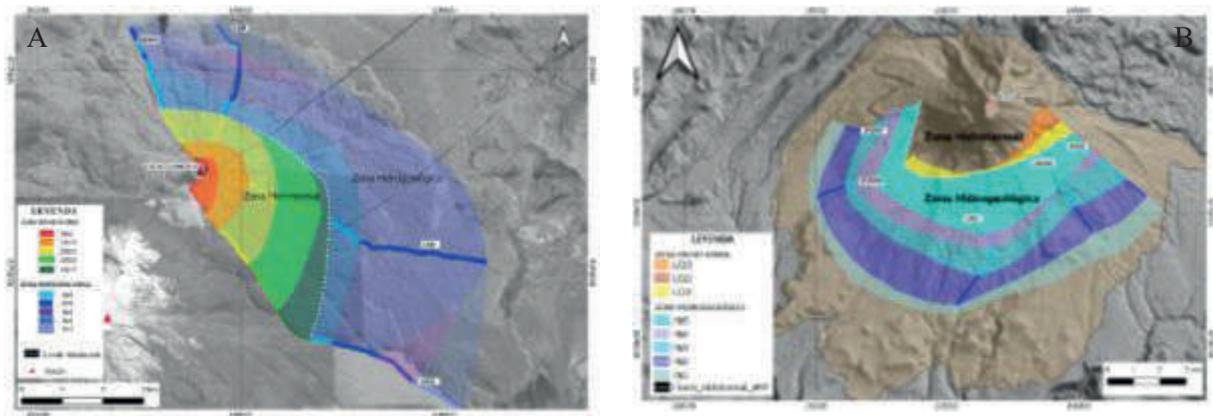


Figura 2. Mapa de horizontes geoelectricos del CVAS. A) Volcán Sabancaya y B) Volcán Ampato.

DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las anomalías S⁺ y A⁺ se encuentran ubicadas sobre la cima de los volcanes Sabancaya y Ampato, respectivamente. Estas anomalías son típicas en volcanes activos. Los volcanes del CVAS presentan sus sistemas hidrotermales muy próximos entre sí y no es posible separarlos, ya que estos sistemas hidrotermales están influenciados uno con el otro e, incluso, dan el aspecto de ser un solo sistema hidrotermal de gran dimensión (Fig. 1 y 3).

Los horizontes geoelectricos han permitido de-

terminar los cambios laterales de litología en el CVAS. En la zona hidrogeológica (zona fría), los fluidos descienden e indican una recarga meteórica del sistema hidrotermal. En la zona hidrotermal (zona caliente), los fluidos ascienden en forma de vapor gracias a la temperatura interna del volcán. Dicha zona se divide en dos: UCz y LCz (Fig. 3 A).

La tercera anomalía negativa H⁻ se ubica en la zona NE del volcán Hualca Hualca, área eminentemente hidrogeológica. Dicha anomalía es muy pronunciada y presenta en su centro un valor mín-

imo de -2013 mV. Este valor es el más bajo en todo el proyecto; no obstante, esta anomalía no se observa en la topografía, siendo esta casi plana. La forma de esta anomalía sugiere la presencia de una antigua caldera impermeable donde se estaría depositando agua meteórica; Una anomalía similar ha sido encontrada en otro estudio de PE realizado en el complejo volcánico de las Cañadas, constituido por tres calderas, en la isla de Tenerife en España (Villasante-Marcos et al., 2014). Esta anomalía negativa de PE, también se ubica en la zona hidrogeológica, y ha sido asociado con un sistema calderico, el más profundo en el sector, que este situado en el medio de la caldera de Diego Hernández.

El borde NO de la anomalía H^- coincide con el centro de la máxima deformación encontrada por Pritchard and Simons, 2002 y 2004 (Fig. 3B). Esta deformación tendría una fuente magmática localizada entre 15 y 18 km de profundidad. Estos resultados muestran una posible interacción entre fallas asociadas al borde de esta caldera de $\sim 8 \times 6$ km y posible inicio de ascensión magmática por esta zona de mayor permeabilidad. Por otro lado, la localización del lineamiento de Sepina con dirección NE-SO pasa por el borde SE de la anomalía H^- ; eso sugiere que el lineamiento de Sepina estaría limitando el borde SE de esta caldera (Anomalía H^-).

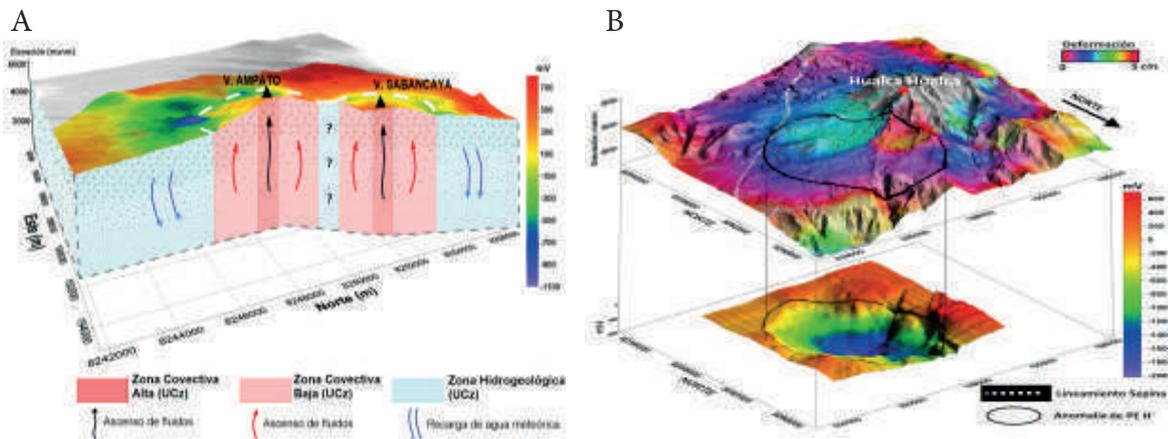


Figura 3. Modelos 3D de las anomalías de PE en el CVASH. A) Circulación de los fluidos en el CVAS: las flechas azules, rojas y negras muestran el descenso y ascenso fluidos. Los signos de interrogación muestran la dificultad de delimitar los sistemas hidrotermales entre los volcanes Ampato y Sabancaya. B) Arriba: Superposición en un modelo numérico de terreno con la deformación del suelo entre 1992 y 1996 (Pritchard & Simons 2002, 2004, modificado). Abajo: Visualización en 3D del mapa de PE mostrando una anomalía negativa de gran amplitud y extensión, interpretada como el borde de una antigua caldera en la zona NE del Hualca Hualca. Se nota que la máxima deformación se encuentra en el borde NO de esta antigua caldera mientras el lineamiento de Sepina está pasando en el borde SE de esta misma caldera.

CONCLUSIONES

Se logró develar la presencia de 3 anomalías importantes en el CVASH: dominio hidrotermal (S^+ y A^+) centrado en el Sabancaya y Ampato, respectivamente, con dimensiones de $\sim 5.9 \times 4.3$ km en el Sabancaya y $\sim 6.3 \times 4.7$ km en el Ampato. La tercera anomalía se ubica en el dominio hidrogeológico (H^-), en la zona este del volcán Hualca Hualca, con dimensiones $\sim 8.6 \times 6.1$ km.

La distribución y circulación de los fluidos en el CVAS muestran una zona de descenso de fluidos que indica un proceso de recarga meteórica al sistema hidrotermal, mientras que, en la zona hidrotermal, los fluidos ascienden por la tempera-

tura interna del volcán.

La anomalía H^- , ubicada en la zona NE del volcán Hualca Hualca, estaría relacionada a la geometría subterránea del piso de una antigua caldera impermeable.

La deformación de origen magmática del volcán Hualca Hualca que coincide perfectamente con el borde NO de esta caldera, muestra que la permeabilidad más alta de este viejo límite estructural podría ser utilizado en el futuro, por ascenso de magma.

Por otro lado, a nivel tectónico, se nota que el lineamiento de Sepina pasa por el borde SE de esta misma caldera.

BIBLIOGRAFÍA

Finizola A., Lénat J-F., Macedo O., Ramos D., Thouret J-C., Sortino F., 2004. Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 135-4, 343-360

Huamán, D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa). Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa. 138 p.

Pritchard, M. E., and M. Simons (2002), A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes, *Nature*, 418(6894), 167–71, doi:10.1038/nature00872.

Pritchard, M. E., and M. Simons (2004), An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5,1–42, doi:10.1029/2003GC000610.

Sébrier, M., Mercier, J., Megard, F., Laubacher, G., Carey-Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Perú. *Tectonics*. 7, 895-928.

Villasante-Marcos, V., Finizola, A., Abella, R., Barde-Cabusson, S., Blanco, M. J., Brenes, B., & Domínguez, I. (2014). Hydrothermal system of Central Tenerife volcanic complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 272, 59-77.