



XVIII Congreso Peruano de Geología

Distribución del Valor de “b” bajo el Volcán Sabancaya y Nevado Hualca Hualca, Periodo 2013-2016

José Torres¹, Orlando Macedo¹, Nino Puma¹, José Del Carpio¹, Riky Centeno¹, John Cruz¹, Yovana Alvarez¹ y Jesús Cáceres¹

¹ OVS, Urbanización la Marina B-19 Cayma, Arequipa, Perú (jtorres@igp.gob.pe)

1. Resumen

Se realizó mapa y perfiles del “valor de b” para la sismicidad volcano-tectónica registrada en la zona del volcán Sabancaya y nevado Hualca Hualca entre 2013 y 2016. Se identificaron tres anomalías ($b \geq 1.4$) de valor de “b”. La primera (A), con $b = 1.4 - 1.9$, localizada al noroeste cráter del volcán Sabancaya, probablemente asociada a una zona altamente fracturada ($z=13\text{km}$) y alterada por pulsos de cuerpos magmáticos provenientes de reservas más profundas ($z=14-20\text{km}$). La segunda (B), con $b = 1.4 - 2.3$, ubicada al norte del volcán Sabancaya, ocurre en dos niveles de profundidad, el primer nivel estaría asociado a una reserva magmática somera ($z=5-10\text{km}$) y el segundo, asociado a un reservorio magmático más profundo ($z=14-20\text{km}$). Finalmente la tercera zona (C) de anomalía, con $b = 1.4 - 2.4$, es superficial ($z=8-15\text{km}$), se localiza al sureste del volcán y estaría asociado al sistema hidrotermal.

Palabras claves: valor -b, sismicidad, distribución frecuencia-magnitud de sismos.

2. Introducción

El volcán Sabancaya (193998E; 8252525S; 5967 msnm) es un estrato-volcán ubicado a 80 km al NNO de Arequipa (Perú). Su última erupción ocurrió en 1990-98, alcanzando un IEV de 3 (Siebert et al, 2010). A partir del 22/02/2013, el volcán muestra importantes signos de intranquilidad, traducido a intensa actividad sísmica y fumarólica. Entre 2013-2016, se registró 99342 eventos sismovolcanicos, 59% del total son clasificados como Volcano-Tectónicos (VT), asociados a ruptura de roca sólida. En base a dichos VTs registrados en el periodo 02/2013-02/2016, en este estudio se intenta ubicar probables cuerpos magmáticos basado en la determinación del parámetro “b” o distribución frecuencia-magnitud (ley de Gutenberg-

Richter, 1994). Diversos trabajos han mostrado que “b” resulta tener altos valores y son asociados a gradientes térmicos elevados, así como ambientes con aumento de presión de poro y alto grado de heterogeneidad, frecuentes en ambientes volcánicos (Wyss, 1973 y Wiemer y McNutt 1997). Para este estudio, el valor “b” ha sido calculado por el método de Máxima Verosimilitud (Aki, 1965 y Utsu, 1965). Por otra parte, Frohlich y Davis (1993) y Kagan, (2003) asocian los valores de “b” con las características físicas de cada zona sísmica, en donde mayores valores de “b” implica predominio de sismos de menor magnitud y es asociada a una zona de baja resistencia a deformarse. Por el contrario, menores valores de “b” sugieren el predominio de sismos de mayor magnitud y son asociados a una zona de mayor resistencia a deformarse. En general, el valor de “b” varía entre 0.4 y 1.8, siendo 1 el valor promedio a nivel global.

3. Datos y Procesamiento

Los datos sismovolcanicos utilizados provienen del registro de estaciones sísmicas instaladas por el Observatorio Vulcanológico del Sur -OVS-, (6 temporales y 3 telemétricas, ver Figura 01). Con los tiempos de las fases P y S, el algoritmo Hypoellipse (Lahr, 1999) y haciendo uso del modelo de velocidades de Dorbath (1991), se ha calculado los parámetros de localización de los sismos VT. Asimismo, se determinaron las magnitudes locales (ML) mediante la relación de Lee (1975). Por otro lado, la expresión (1) ha sido usada para calcular la distribución frecuencia - magnitud, donde N es el número acumulado de eventos con magnitudes mayores a M; a y b son constantes y M es la magnitud del evento.

Para calcular el “valor de b”, se utiliza la expresión (2), es decir el método de máxima verosimilitud. En dicha expresión, $[M]$ = valor medio de todas las magnitudes y M_c = Magnitud de Completitud que ha sido definida por el

método máxima curvatura, medido en la primera derivada de la distribución frecuencia – magnitud (Wyss et al., 2000).

Con los valores obtenidos se elaboraron mapas y perfiles del “valor de b” haciendo uso del programa ZMAP (Wiemer y Wyss, 1997). Para los mapas se escogió una densa retícula de puntos (nodos), cuyo espaciado fue de 100 m x 100 m, y se consideró todo evento dentro de un radio de 2 km alrededor de cada nodo. Para el caso de perfiles, el espaciado fue 100 m (horizontal) x 100 m (profundidad).

4. Resultados y Discusiones

Se ha dispuesto de un total de 11190 VTs bien localizados, con magnitudes entre 1.5 y 5.7 ML, cuyos focos se encuentran en dirección NO, N y E respecto al volcán Sabancaya (Figura 01).

[Figura 01]

En la Figura 02, se observa el mapa de “valor de b” para $z=0$ km, y se distingue 3 zonas anómalas ($b \geq 1.4$) denominadas A, B y C. La primera (zona A) está situada a 17 km en dirección noroeste, del cráter del volcán Sabancaya, sobre el foco sísmico 1 ($b = 1.4 - 1.9$). La zona B está ubicada a 8 km en dirección norte del cráter, sobre el foco 2 ($b = 1.4 - 2.3$), y la zona C está emplazada al sureste del cráter, a 12 km, sobre el foco 3 ($b = 1.4 - 2.4$).

[Figura 02]

La Figura 03 y Figura 04 muestran, por su parte, tres perfiles en dirección O-E, NO-SE y S-N sobre los 3 focos sísmicos principales (foco 1, foco 2 y foco 3), entre 12 km y 20 km de longitud y 10 km de espesor.

La zona anómala A del perfil O-E (Figura 03), ubicada al noroeste a 13 km de profundidad, correspondería a una zona altamente fracturada (materiales heterogéneos y/o sistema hidrotermal) y alterada posiblemente con presencia de fluidos magmáticos que ascienden de reservas más profundas (14-20 km). Es posible que tales condiciones hayan generado el enjambre sísmico del 16-17 de julio de 2013 (3 sismos de 4.9 a 4.2 ML y 5.7 ML) y reactivado las fallas (Sebrier y Soler, 1991) existentes en la zona, con deformaciones medidas en superficie por Jay et al (2015) entre mayo y julio 2013. Por otro lado la zona anómala C del perfil NO-SE (ver Fig. 03, derecha), no aparece bien delimitada aproximadamente entre 8 y 15 km de profundidad. En este sector se registró la ocurrencia de un enjambre sísmico (20 de febrero de 2016) con eventos principales de 4.2 y 5.4 ML, y en superficie se han reconocido fallas activas; por su posición, posiblemente esté relacionada al sistema hidrotermal en superficie.

[Figura 03]

En lo que respecta al perfil S-N (Figura 04), se observa que bajo la zona B existen dos sectores anómalos (B1 y B2). La zona superficial (B1), ubicada entre 5 y 10 km de profundidad, correspondería a una zona de reserva magmática somera o una zona alterada y fracturada, compatible con una posible presencia de fluidos magmáticos en estructuras de sill y diques interconectados, tal como sugiere Chouet et al (2005) en este tipo de ambientes. Por otro lado, en las parte más superficiales de la zona B1, es posible que exista la

interacción del sistema hidrotermal y la reserva magmática somera (Figura 05), lo cual puede explicar la generación de las dos explosiones freáticas registradas el 9 y 25 de agosto de 2014 (Reportes IGP-OVS N° 08-2014 y N° 10-2014). En esa época se observó también fumarolas de hasta 3 km de altura (Reporte N°07-2014) e incremento en los valores de temperatura de 33 °C en el 2013 (Jay et al, 2015).

[Figura 04]

Asimismo, la segunda zona o zona B2 del perfil S-N, estaría asociando a una posible reservorio magmático situado entre 14 y 20 km de profundidad (Figura 04 y Figura 05). Gran parte de la actividad sísmica de tipo fractura (VT) que se registra por encima de este sector y que alcanza magnitudes importantes (≥ 4 ML) sería causado por la dinámica de ascenso de fluidos hacia la superficie. En la Figura 06, se observa eventos principales de magnitud ≥ 4.0 ML entre 10-15 km de profundidad (estrellas amarillas), precedidos por eventos precursores profundos de menor magnitud (puntos rojos).

[Figura 05]

Asimismo, en la Figura 05 se observa que en estos mismos niveles de profundidad (10-15 km) los valores de “b” son normales, lo cual indica que esta zona es mucho más resistente a la deformación. Por encima y por debajo de esta zona, los sismos que han ocurrido son de menor magnitud (ver Fig. 06) lo cual indica una tendencia a no acumular tensiones es decir menor resistencia a deformarse. Nosotros pensamos, que los sismos profundos (puntos rojos en la Fig. 06) ocurrirían por perturbación de la reserva magmática profunda (B2) en etapas de ascenso de material magmático, y serían seguidos de sismicidad más superficial asociada al ascenso de fluidos en dirección de la superficie.

[Figura 06, en dos columnas de ancho]

Finalmente, las reservas magmáticas obtenidas en este trabajo se sitúan por debajo del área ocupada por el nevado Hualca-Hualca, y podrían estar asociadas a la zona de deformación reportada durante la anterior erupción 1990-1998 que fue estudiada por Pritchard et al (2002).

5. Conclusiones

Con 11190 eventos VT de magnitudes entre 1.5 - 5.7 ML se han identificado 3 focos sísmicos situados en dirección NO, N y NE del volcán Sabancaya. Asimismo, se identificaron 3 sectores anómalos de valor de “b” ($b \geq 1.4$) localizados a 17, 8 y 12 km en dirección NO, N y SE, respectivamente, donde se han obtenido 3 perfiles según las direcciones O-E, S-N y NO-SE, e identificado 3 anomalías A, B, C.

La zona de anomalía A ($b = 1.4-1.9$), localizada al noroeste del volcán Sabancaya y 13 km de profundidad, probablemente esté altamente fracturada y alterada en presencia de fluidos magmáticos provenientes de reservas más profundas ($z = 14-20$ km). La zona de anomalía B ($b = 1.4 - 2.3$) situada al norte del volcán, se divide en dos sub niveles de profundidad: El primero (B1) asociada a una posible reserva magmática somera ($z = 5-10$ km) y el segundo (B2), asociada a un reservorio magmático más profundo ($z = 14-20$ km). La zona de anomalía C ($b = 1.4 -$

2.4) situada al noreste, en una zona de alta sismicidad en enjambre, no aparece bien delimitada; posiblemente está asociada a zona hidrotermal en superficie.

Agradecimientos

Deseo expresar mi mayor agradecimiento al Observatorio Vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú (OVS-IGP) por darme las facilidades en el manejo de la información sísmica. Además agradecer el apoyo constante del director e investigador principal Dr. Orlando Macedo y compañeros de la institución mencionada.

Referencias

- Aki, K. 1965. Maximum Likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. In: Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 43 Tokyo (Japan): University of Tokyo, p. 237-239. ISSN: 0040-8972.
- Chouet, B., Dawson, P., Arciniega-Ceballos, A. 2005. Source Mechanism of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from moment-tensor inversion of very-long-period signals. *J. Geophys. Res.* 110, B07301.
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. 1991. Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Jour. of South American Earth Sciences.*, 4, 13-24.
- Frohlich C. y Davis S. 1993. Teleseismic b -Values: Or, Much Ado about 1.0 *Jour Geophys. Res.* 98, 631-644.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188.
- Jay, J., Delgado, F., Torres, J.L., Pritchard, M., Macedo, O., and Aguilar, V. 2015. Deformation and seismicity near Sabancaya Volcano, southern Peru, from 2002-2015. *Geophysical Research Letters*. p. 5-10.
- Kagan, Y. Y. 2003. Accuracy of modern global earthquake catalogs. *Phys. Earth Planet. Inter.* 135, 173-209.
- Lahr, J. 1999. - Hypoellipse user guide, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.
- Lee, W. H. K., & Lahr, J. C. 1975. HYP071 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. US Department of the Interior, Geological Survey, National Center for Earthquake Research.
- Pritchard, M. E. & Simons, M. 2002. A satellite geodetic survey of large-scale deformations of volcanic centres in the central Andes. *Nature*, 418(6894), 167-71.
- Sebrier, M. and Soler, P. 1991. Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the Present. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 265, 259-278.
- Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly, P. 2010. *Volcanoes of the world*. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Utsu, T. 1965. A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes, *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 13, pp. 99-103.
- Wiemer, S., and McNutt, S. R. 1997. Variations in frequency-magnitude distribution with depth in two

volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. *Geoph. Res. Letts.*, 24, 189-192.

Wiemer, S. and Wyss, M. 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 102(B7), 15115-15128.

Wyss, M. 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31, pp. 341-359.

Wyss, M., Schorlemmer, D. and Wiemer, S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time: The San Jacinto-Elsinore fault zones. *J. Geophys. Res.*, 105, 7829-7844.

Ilustraciones

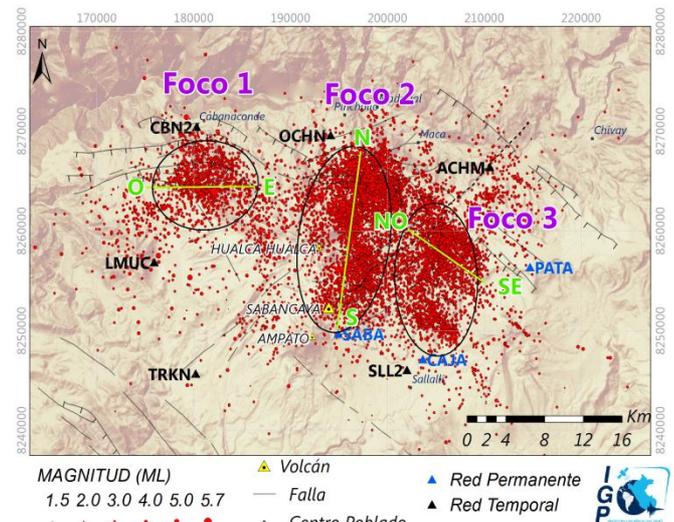


Figura 01.- Mapa de actividad sísmica del complejo volcánico Sabancaya-Hualca Hualca (puntos rojos). Los elipses negras delimitan los 3 focos sísmicos y líneas verdes son los perfiles realizados en dirección O-E, S-N y NO-SE.

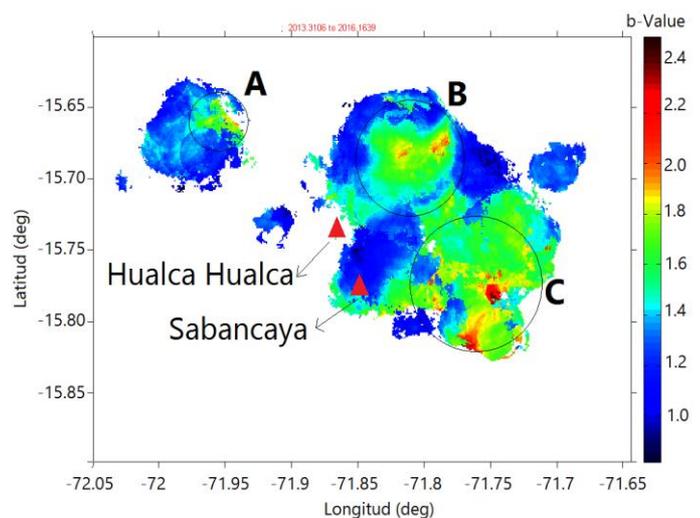


Figura 02.- Mapa del valor del "b" para $z=0$ km. Se muestra tres zonas anómalas A, B y C. Los triángulos rojos representan los volcanes.

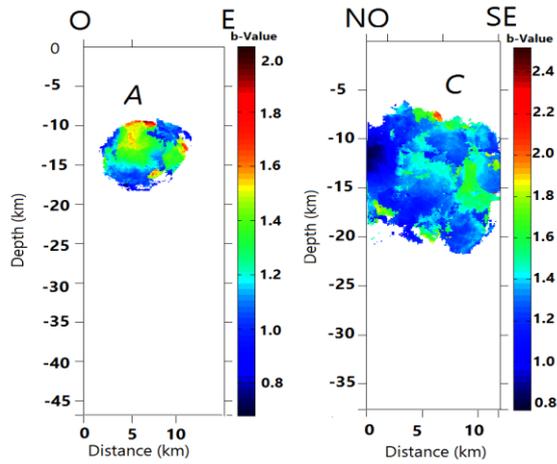


Figura 03.- Perfiles de valor de "b" en dirección O-E (izquierdo) y NO-SE (derecha). En profundidad, el comportamiento de las anomalías A y C se muestra variado.

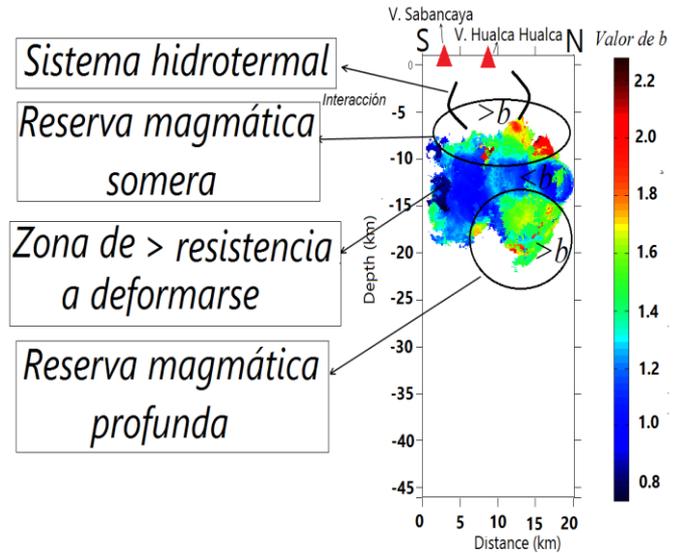


Figura 05.- Perfil S-N, muestra delimitado en elipses negras la posible ubicación de la reservas magmáticas somera y profunda. En estos sectores, se observó mayores valores de valores de "b" y ocurrencia de sismos de menor magnitud. Los triangulo rojos representan los volcanes.

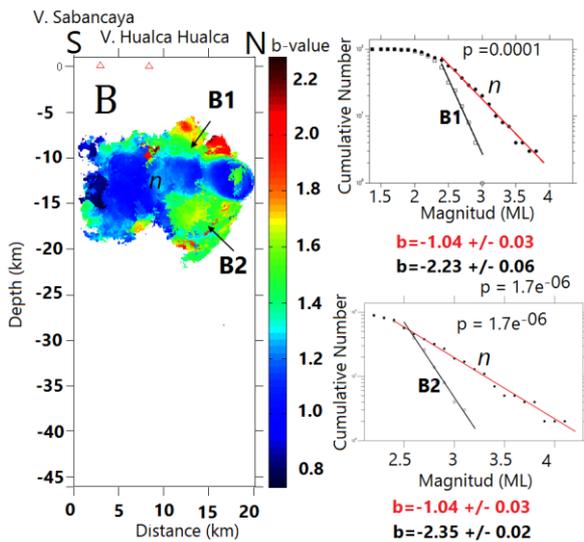


Figura 04.- Perfil del valor de b en dirección S-N, en profundidad se divide en dos sectores anómalos (B1 y B2). El lado derecho, muestra la relación frecuencia-magnitud de cada a zona anómala con "n" de valor de "b" normal (<1.2).

CATALOGO DE EVENTOS VT (2013-2016)

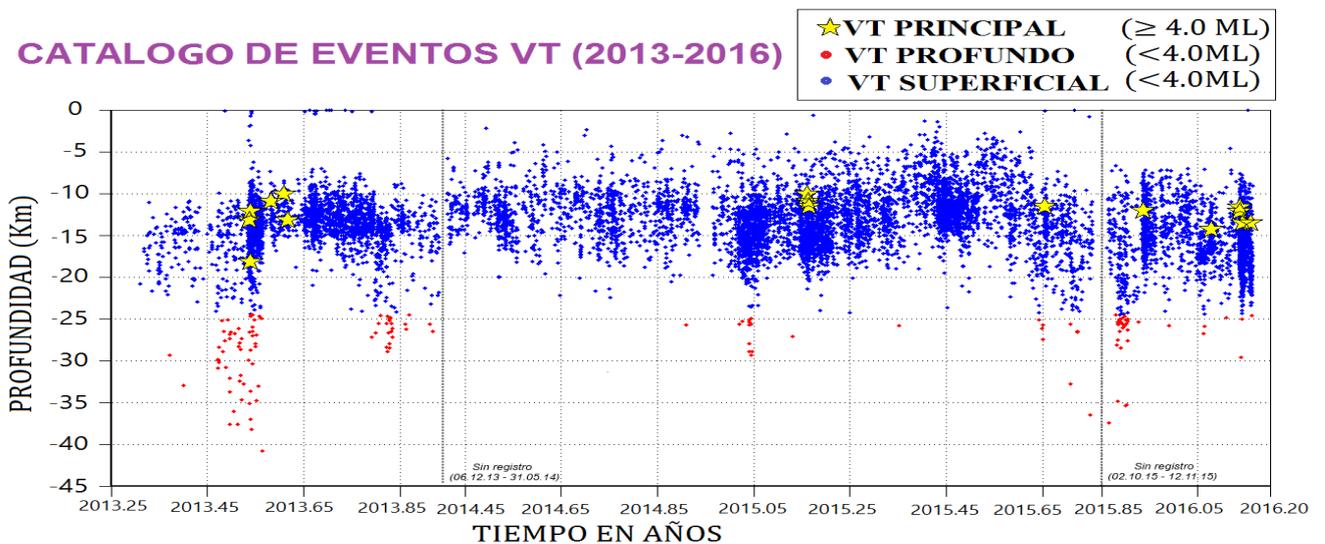


Figura 06.- Grafico de profundidad de eventos VT versus el tiempo (años). Las estrellas amarillas representan a sismos principales (magnitudes mayores a 4.0 ML) precedidos por sismos profundos de menor magnitud (puntos rojos).