

Actividad sísmica distal en el volcán Sabancaya (2015 - 2017)

Rosa Ancasi¹, Mayra Ortega¹, Beto Ccallata¹ y Roger Machacca¹

¹ Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, OVI – <http://ovi.ingemmet.gob.pe/>

Palabras clave: Volcánico Tectónico Distal, intrusión magmática.

1. INTRODUCCION

El volcán Sabancaya, se encuentra localizado en el sur del Perú, región de Arequipa y provincia de Caylloma (Figura 1). Ha tenido por lo menos 3 erupciones durante la época histórica, en los años 1750, 1784 d.C. y la última entre 1990 y 1998, clasificándose a esta erupción como tipo Vulcaniana (Thouret et al., 1994).

A inicios del 2013, el volcán Sabancaya volvió a mostrar cambios en su actividad mediante emisiones fumarólicas, seguidas de enjambres sísmicos (GVP, 2013, Jay et al., 2015), se observó una calma hasta julio del 2014. Sin embargo, desde agosto del mismo año se identificó indicios de un nuevo proceso pre-eruptivo, caracterizado por el registro de sismos distales y emisiones de gases volcánicos. Finalmente, en noviembre del 2016 se inicia un nuevo proceso eruptivo, precedido por grupos de sismos distales (VTD), enjambres de híbridos asociados al ascenso de magma y deformación en el flanco Sureste del volcán.



Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Sabancaya dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

2. RED SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), realiza un monitoreo interdisciplinario continuo (sísmico, geodésico, geoquímico y visual) del volcán Sabancaya. Durante los años 2015 y 2017,

la red sísmica del OVI estuvo conformada por ocho estaciones sísmicas. En la actualidad cuatro de ellas cuentan con transmisión telemétrica de datos en tiempo real al OVI (SAB07, SAB10, SAB11 y SAB16), dos estaciones son temporales (SAB14 y SAB15) y dos estaciones inoperativas (SAB12 y SAB13), todas ellas con sismómetros de banda ancha (Guralp-6TD) (Figura 2.). Los resultados presentados aquí corresponden al tratamiento de datos de esta red.

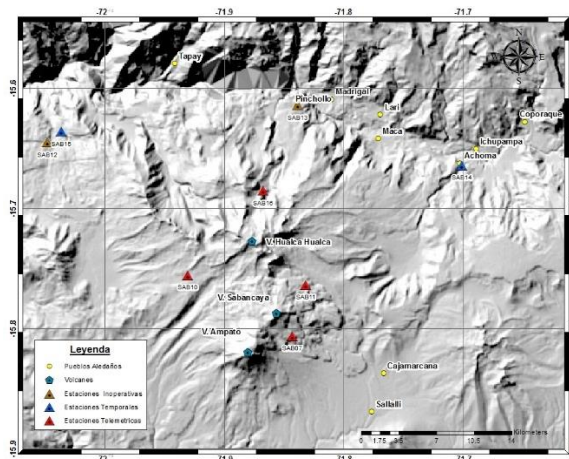


Figura 2. Mapa de ubicación de las estaciones sísmicas desplegadas por el OVI-INGEMMET durante el año 2015 – 2017.

3. ACTIVIDAD SÍSMICA 2015 - 2017

La sismicidad del volcán Sabancaya durante el 2015 y 2017 estuvo caracterizada por el registro de sismos tipo volcano tectónico (VT) asociados al fracturamiento de rocas, presurización del sistema (sismos tornillos - TOR), movimiento de fluidos volcánicos (Largo periodo - LP), ascenso y/o movimiento de magma (Híbridos – HYB), actividad tremórica relacionada a la emisión de gases y/o ceniza (Tremor – TRE) y explosiones (EXP) (Figura 3.)

La Figura 3, muestra la distribución espacial y en profundidad de los sismos tipo VTD registrados durante el 2015 y 2017. Para la localización de estos sismos se empleó el programa hypoellipse (Lahr, 1999), el modelo de velocidades propuesto por Dorbath (1991), la relación Richert de 1935 para estimar la magnitud local (MI). La incertidumbre de

la localización horizontal y vertical de los sismos fue de 2.5 y 2.6 km respectivamente.

Durante el 2015, se localizaron 492 sismos VTD principalmente ubicados al NNE y NO del volcán, que presentaron magnitudes hasta 4.1 MI y profundidades de ~20 km aproximadamente (Figura 3).

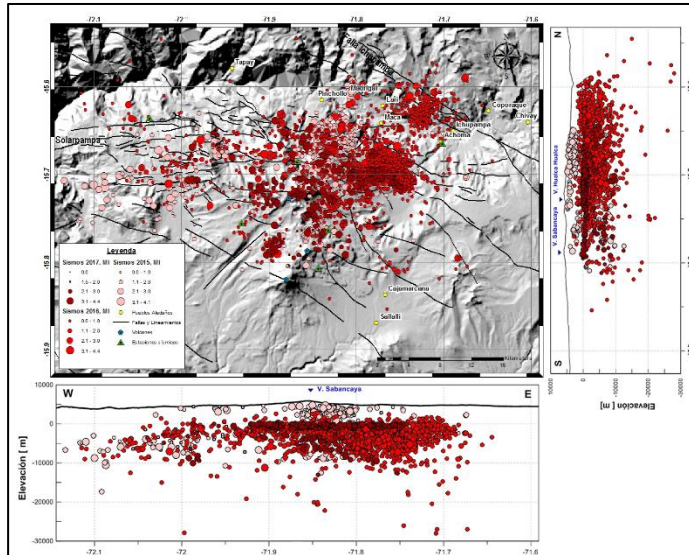


Figura 3. Mapa de localización de sismos Volcano Tectónico - VTD y perfiles en profundidad durante los años 2015 - 2017.

Por otro lado, durante el 2016 la sismicidad tipo VTD se incrementó sustancialmente, registrándose un total de 2709 sismos localizados al NE del volcán, con magnitudes hasta 4.4 MI y profundidades de ~30 km. Finalmente la localización de los sismos VTD durante el 2017 fue menor, registrándose 347 eventos, se ubicaron principalmente al NE del volcán, con magnitudes hasta 4.4 MI y profundidades hasta los 10.5 km (Figura 3).

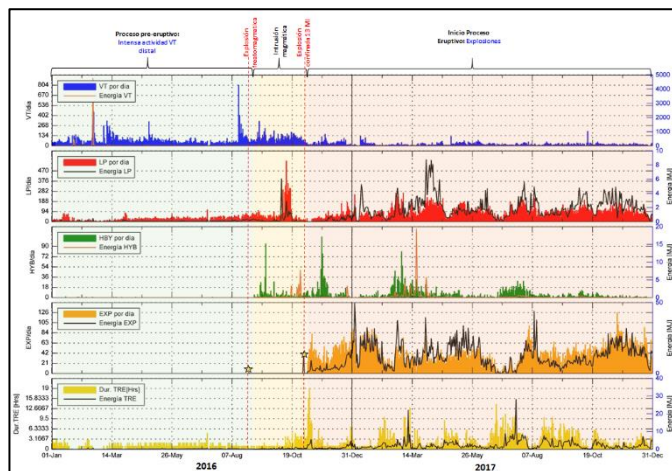


Figura 4. Actividad sísmica del volcán Sabancaya durante el 2016 y 2017.

Después de la intensa actividad sísmica VT distal (VTD) registrada el 2015 y sobre todo el 2016, el 27 de agosto del 2016 se produjo una explosión freática, la cual liberó 1.0 MJ de energía. A partir del 03 de septiembre se observó un importante incremento en el número de sismos tipo híbrido, el cual se dió a manera de enjambres (asociados al ascenso de

magma), estos eventos liberaron energías considerables (entre 50 a 90 MJ por día). Durante este periodo se presentó mayor actividad sísmica tipo Largo Periodo – LP (asociada al movimiento de fluidos volcánicos). Posteriormente, el 02 de noviembre se registró una explosión considerada la más energética del proceso eruptivo, la cual liberó 13 MJ de energía. Esta explosión fue denominada “confinada” o “enterrada”, ya que no se observó emisión alguna en superficie. Finalmente, el 07 de noviembre se inicia el registro de explosiones continuas y una importante actividad tremórica, ambas asociadas a la emisión de ceniza. Simultáneamente se siguió registrando eventos híbridos que indicaban un aporte continuo de magma (Figura 4).

4. GRUPOS DE SISMOS VOLCANO TECTÓNICO DISTALES (VTD) 2015-2017

Desde el 2015 hasta el 2017 se han producido alrededor de **3548** sismos VTD en los alrededores del volcán Sabancaya, pero solo **1827** ocurrieron en grupos y se registraron en tiempos y espacios similares. En adición, los grupos de sismos fueron más frecuentes a inicios del 2016, cuando también empezó a registrarse mayor actividad proximal referida a sismos LP, HYB y TRE.

En la Figura 5 se muestra la ocurrencia en tiempo de seis grupos sísmicos VTD durante el 2015 y 2016. Se puede observar que, durante el año 2015, los sismos VTD se registraron en dos grupos principales, denominados G1 y G2; por otro lado, en el año 2016 se registraron cuatro grupos de sismos VTD denominándose a éstos G3, G4, G5 y G6, algunos de ellos se presentaron simultáneamente a lo largo del año. La Figura 6 muestra la ubicación de estos grupos de sismos VTD, que de forma general se ubicaron al NE del volcán, entre 3.6 y 22.5 km de distancia respecto al cráter y cuyas profundidades llegaron hasta los ~8 km.

A continuación, se describen las principales características de los grupos de sismos VTD's determinados durante los años 2015 y 2016:

G1: Estos sismos se registraron entre el 28 de agosto y 02 de septiembre del 2015 y se contabilizaron un total de 24 sismos (Figura 5), los cuales se ubicaron a 3.5 km al NNO del cráter y con profundidades hasta los 3.6 km respecto al nivel del mar.

G2: Estos eventos se presentaron durante el 2015, entre el 10 de marzo - 17 de abril y entre el 05 de junio - 05 de julio, se registraron un total de 163 sismos ubicados a 15.5 km al NNO del volcán y profundidades que llegaron hasta 13.4 km respecto al nivel del mar.

G3: Los sismos pertenecientes a este grupo se registraron entre el 01 de enero y el 06 de febrero, y entre el 21 y 29 de septiembre del 2016, un total de 68 sismos se localizaron a 6.7 km al NE del volcán y profundidades hasta los 3.7 km respecto al nivel del mar.

G4: Este grupo de sismos se registraron entre el 19 de febrero y 31 de marzo del 2016, con un total de 176 sismos, los cuales se ubicaron a 11.6 km al NE del volcán y presentaron profundidades hasta los 8.1 km respecto al nivel del mar.

G5: Este grupo fue el más numeroso de todos, registrándose 1142 sismos, los cuales se presentaron en los siguientes periodos: del 03 al 24 de enero, del 06 de febrero al 11 de marzo, del 01 de abril al 04 de julio, del 20 de julio al 30 de septiembre y finalmente del 01 de octubre al 29 de diciembre. Estos sismos VTD se localizaron a una distancia de 14.7 km al NE del cráter del volcán, las profundidades se registraron hasta los 6.2 km.

G6: Los sismos VTD se registraron entre el 03 y 05 de mayo; y el 15 de agosto y 29 de septiembre, ubicados a 22.5 km al NNO del volcán y las profundidades que presentaron fueron hasta los 5.9 km respecto al nivel del mar.

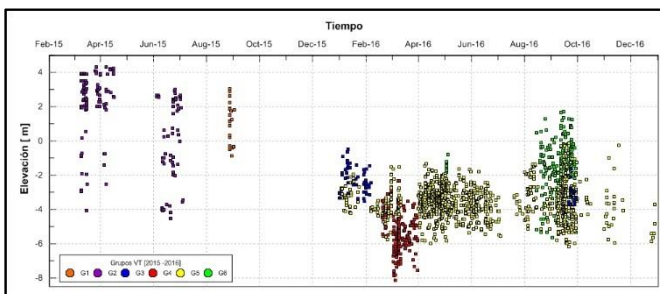
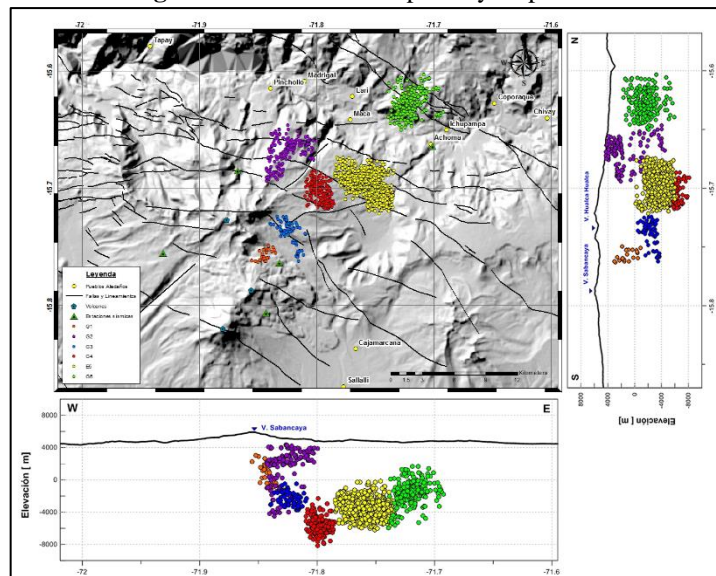


Figura 5. Ocurrencia de grupos sísmicos tipo VTD registrados durante el 2015 y 2016 en el volcán Sabancaya.

Figura 6. Localización espacial y en profundidad de



grupos sísmicos distales (VTD) registrados entre el 2015 y 2016 en el volcán Sabancaya. G1: Grupo 1 (naranja), G2: grupo 2 (morado), G3: grupo 3 (azul), G4: grupo 4 (rojo), G5: grupo 5 (amarillo) y G6: grupo 6 (verde).

5. MECANISMOS FOCALES

Los mecanismos focales para los sismos registrados en el volcán Sabancaya fueron obtenidos a partir de la distribución del sentido del primer impulso de la onda P, identificadas en un mínimo de seis estaciones sísmicas. El procesamiento de los mismos se hizo a través de los programas FOCMEC (Snook, 2003) HASH (Hardebeck & Shearer, (2008) y FPFIT (Reasenber & Oppenheimer, 1985) en entorno de Seisan (Ottmoller & Havskov, 2016). Se tomaron las siguientes consideraciones para la selección de buenos resultados, como: buena cobertura azimutal ($Gap < 180^\circ$), errores de localización < 2.0 km y errores en el *strike*, *dip* y *rake* de $< 15^\circ$. La Figura 7 muestra la solución de los mecanismos focales calculados para el sismo registrado el 15 de agosto del 2016 (Fuente IGP) y dos sismos registrados durante el 2017.

El sismo registrado el 15 de agosto del 2016, tuvo una magnitud de 5.3 MI y una profundidad de 8 km. Este sismo se ubicó sobre la falla de Ichupampa, presentó un mecanismo focal asociado a una falla normal con una gran componente de desgarre, casi describiendo un proceso de ruptura de tipo desplazamiento horizontal, en donde el extremo norte de la falla se ha desplazado hacia el oeste y el bloque inferior hacia el este (Tavera et al., 2016). En cuanto a los mecanismos focales calculados para 06 de febrero y 25 de junio del 2017, muestran mecanismos de tipo transcurrente con eje de tensión

(T) orientado en dirección W-E y presión (P) en dirección N-S y de tipo normal, con ejes de tensión (T) y presión (P) orientados en dirección NW-SE, respectivamente. Ambos mecanismos indicarían que la zona ubicada al Noreste del volcán Sabancaya estaría sujeta a esfuerzos de tipo extensional y de traslación, los cuales seguirían una alineación NW-SE, y muy probablemente relacionadas con el conjunto de sistema de fallas que se observa en la zona.

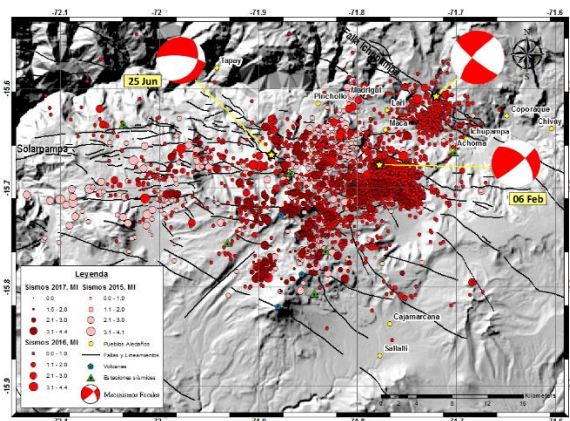


Figura 7. Mecanismos focales calculados en el volcán Sabancaya.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La actividad sísmica alrededor del volcán Sabancaya, al inicio de la reactivación, desde principios del 2013 comenzó con sismicidad distal VTD y se intensificó durante el 2015 y 2016, con focos localizados hasta 22.5 km al NE del volcán. Estos sismos ocurrieron cerca de fallas y lineamientos en la zona.

El presente estudio propone que una inyección magmática desencadenó este tipo de sismicidad distal, probablemente por el esfuerzo generado en las estructuras geológicas (fallas y fracturas). Estos, a su vez, habrían influido en el inicio de un actual proceso eruptivo en noviembre del 2016. Casos notables en los que los sismos distales de tipo VT precedieron a las erupciones en volcanes inactivos son: Nevado del Ruiz (1984-1985), Pinatubo (1991), Unzen (1989-1995), Soufriere Hills (1995), Shishalden (1989-1999), Tacaná (1985-1986), Pacaya (1980), Rabaul (1994), Cotopaxi (2001). Casos adicionales son reconocidos en volcanes frecuentemente activos, incluyendo Popocatépetl (2001-2003) y Mauna Loa (1984). Se conoce que esta sismicidad de tipo VTD se origina en focos muy alejados de la fuente de una eventual erupción, a distancias laterales que van de unos pocos a más de 30 km de distancia, las profundidades a las que se producen son similares a las distancias (White & McCausland, 2016). También indican que la ocurrencia de los sismos VTD aumenta en número y energía en el tiempo, respecto al inicio

de un proceso eruptivo. Es así que observamos que los grupos de sismos VTD registrados en el volcán Sabancaya a inicios del 2016, ocurrieron con mayor frecuencia, además del aumento progresivo de la sismicidad proximal referida, principalmente, a eventos relacionados al movimiento y/o ascenso de magma (sismos LP e Híbridos) que terminaron dos meses después, en el inicio de explosiones y actividad tremórica continua. De este modo indicaría que la sismicidad distal que generó esfuerzos en las fallas y la sismicidad próxima debido al ascenso de magma precedieron la erupción. Por otro lado, los mecanismos focales determinarían que la zona estaría sometida a esfuerzos extensionales, relacionadas al sistema de fallas y fracturas.

Referencias

- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. (1991). - Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-Andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 4. 16 p.
- Hardebeck, J. & Shearer, P. (2008). HASH: A FORTRAN Program for Computing Earthquake First-Motion Focal Mechanisms-v1.2. U.S. Geological Survey and Institution of Oceanography, p 1-17.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.
- Fisher M, Ruppert N, White R, Wilson F, Comer D, Sliter R, Wong F. (2009). A distal earthquake cluster concurrent with the 2006 explosive eruption of Augustine Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 469, 25-36 p.
- Jay F, Francisco J, Delgado F, Torres J, Pritchard M, Macedo O y Aguilar V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42, doi: 10.1002/2015GL063589.
- Ottmoller, L. & Havskov, J. (2016). SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and Macosx, Version 10.4. 1-444 p.
- Reasenber, P. & Oppenheimer D. (1985). FPFIT, FPLOT AND FPPAGE: Fortran Computer Programs for Calculating and Displaying Earthquake Fault-Plane solutions. U.S. Geological Survey open-file Report N°. 85-739 p.
- Snoke, A. (2003). FOCMEC: FOCal MECHANISM Determinations. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA. 1-21.
- Tavera H, Guzmán J, Velarde L y Cuya A. (2016). Sismo de Ichupampa del 14 de agosto del 2016 (5.3 MI). *Instituto Geofísico del Perú*. 9-10 p.
- Thouret, J.-C.; Guillaude, R.; Huamán, D.; Gourgaud, A.; Salas, G. & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France*, 165(1): 49-63 p.
- White, R. & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2-7 p.