

segmentos que se extienden a lo largo de 30 km (figura 4). Por otro lado, en Pampa Sepina (figura 4), se muestra los lineamientos tectónicos obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales y de observaciones de campo in situ por Sébrier et al., (1985), Huamán et al., (1991) y Méring et al., (1996).

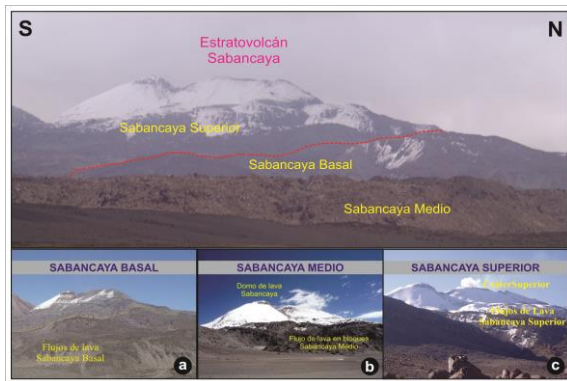


Figura 3: Vista de las unidades volcánicas del volcán Sabancaya. a) Unidad volcánica Sabancaya Basal. b) Unidad volcánica Sabancaya medio y c) Unidad volcánica Sabancaya Superior.

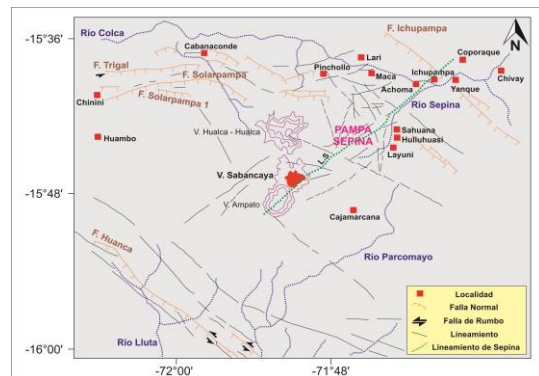


Figura 4: Principales Falla y lineamientos del área de estudio (Mering et al., 1996; Sebrier et al., 1985). LS = Lineamiento de Sepina.

METODOLOGÍA, DATOS Y PROCESAMIENTO

MODELO GEOMÉTRICO

Se plantea un modelo de fuente donde el decaimiento armónico en la forma de onda está relacionado con la respuesta acústica de un sistema resonador excitado por la presión transitoria de algún fluido que llena la cavidad resonante. Como la frecuencia compleja depende de las propiedades acústicas de los fluidos y sólidos y de la geometría del resonador, se puede estimar el estado de los fluidos que se encuentran dentro del resonador. Según el modelo planteado por Aki et al., 1977; Chouet et al., 1986, 1988, 1996; Kumagai et al., 1999, 2000, 2001, los parámetros que intervienen en este sistema son α/a , b/μ y la rigidez de la fractura $C = (b/\mu)(L/d)$, donde α es la velocidad de la onda compresional en la roca matriz, a es la velocidad del sonido en el fluido, b es el módulo de volumen del fluido, μ es el módulo de rigidez del sólido, L y d son la longitud y abertura de la fractura respectivamente (Figura 5).

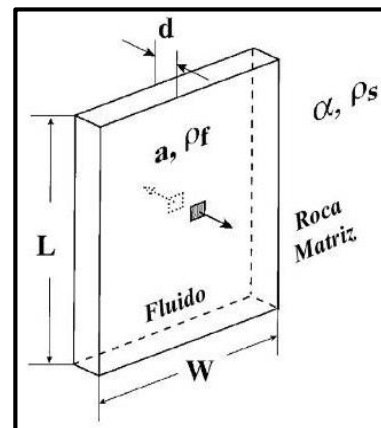


Figura 5: Modelo geométrico de la fractura llenada por el fluido, donde ρ_f es la densidad del fluido y ρ_s es la densidad del sólido.

MÉTODO DE ANÁLISIS ESPECTRAL SOMPI

Se basa en el concepto físico de las propiedades que caracterizan un sistema dinámico lineal, que se describe por una ecuación diferencial lineal. Debido a la equivalencia de una ecuación diferencial lineal y una diferencia de ecuación lineal, este método toma la forma del conocido método de AR (autoregresión) que junto con la optimización del modelo basado en el principio de máxima verosimilitud ha dado lugar a un algoritmo de estimación espectral con más alta resolución y fiabilidad. Kumagai & Chouet (2000), estimaron experimentalmente el factor Q y la frecuencia adimensional $\nu = fL/\alpha$ los cuales se presentan en los gráficos de la figura 6, para calcular estos valores ellos consideraron diferentes fluidos y mezclas de estos con sólidos, mezclas de gases, líquidos y sólidos incluyendo mezclas de gas-gas (H_2O-CO_2), mezclas líquido-gas (Agua - H_2O , Basalto - H_2O) y mezclas de gases con partículas en suspensión y gases con vapor de agua (ceniza - SO_2 , gotas de agua - H_2O). Estos gráficos permiten, en un proceso de análisis inverso, estimar la composición del fluido o gas que permite la resonancia en la cavidad fuente.

DATOS Y PROCESAMIENTO

Los registros sísmicos utilizados corresponden desde marzo hasta mayo. Durante este periodo de análisis se tienen datos de 01 estación sísmica en tiempo real. Se realizó la clasificación de las señales sísmicas de la base de datos en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, de las cuales se identificaron 26 sismos de tipo Tornillo, a los que se les aplicó el algoritmo de análisis **SOMPI** escrito en la plataforma MATLAB como **Qsomp** (Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales). Este análisis permite obtener la serie de tiempo descompuesta en una combinación lineal de sinusoides con amplitudes que decaen con el tiempo (figura 7).

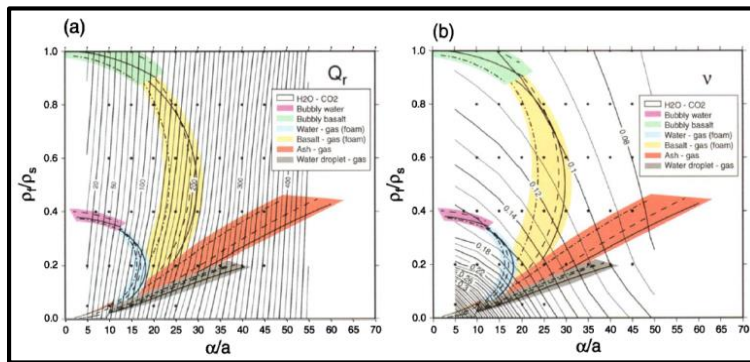


Figura 6: Gráfico de α/a versus p/p_s , con curvas de diferentes colores para varios tipos de fluidos y contornos de color amarillo para valores de Q y v . las marcas de color blanco representan los puntos donde se calcularon los valores con eventos sintéticos (Kumagai & Chouet, 2000).

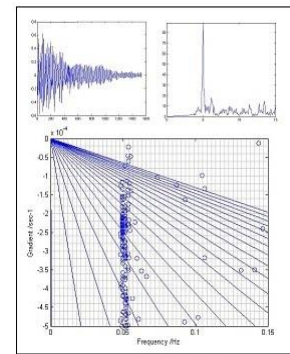


Figura 7: Tornillo registrado el día 17 de Abril del 2013 a las 21:23 horas UTC.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La figura 8 muestra la variación temporal de Q y f , para el período Marzo – Mayo del 2013, durante la crisis sísmica del volcán Sabancaya. Se observa que el valor de Q sufre variaciones durante este periodo de análisis. Para lo cual se ha diferenciado 3 episodios de ocurrencia de sismos de tipo tornillo:

I EPISODIO

Correspondiente al mes de marzo, se ha identificado 6 sismos de este tipo y según la Figura 8, los valores de Q oscilan entre 40 y 160, mientras que la frecuencia está alrededor de los 5 Hz, por lo tanto, según la figura 6, estos valores corresponderían a fluidos compuestos por agua y gases.

II EPISODIO

Comprende al mes de abril, se han identificado 17 sismos de tipo Tornillo. En la Figura 8, se observa mayor ocurrencia de este tipo de sismos, los cuales presentan dos frecuencias dominantes, la primera mantiene la misma fuente del episodio anterior, es decir, presenta una frecuencia alrededor de los 5 Hz, mientras que la segunda frecuencia dominante está alrededor de los 2 Hz, por lo tanto, se presume que podría tratarse de una nueva fuente que apareció en este episodio. En cuanto a los valores de Q , estos varían entre 30 y 130 que según los gráficos de la Figura 6, indicaría un incremento de vapor de agua y gas en la fuente resonante.

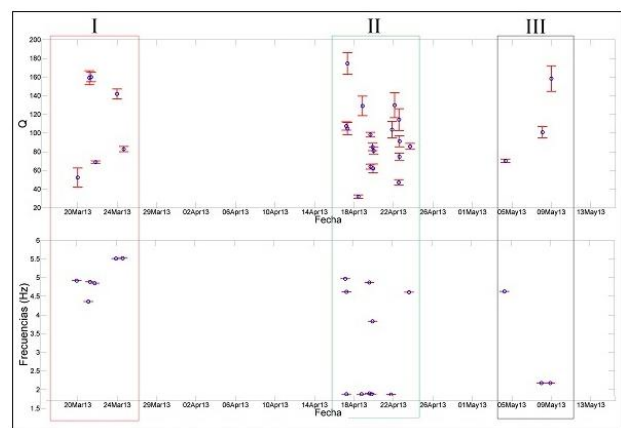


Figura 8: Análisis de la variación temporal de Q (adimensional) y F (Hz) para los sismos de tipo **TORNILLO** registrados entre marzo y mayo del 2014.

III EPISODIO

Que corresponde al mes de mayo, en donde se han identificado 3 sismos de tipo Tornillo. Según la figura 8, la frecuencia dominante esta alrededor de los 2 Hz, mientras que el factor de calidad Q del resonador varía entre los 70 y 160. Cabe resaltar que, el número de eventos ha disminuido drásticamente con respecto al episodio anterior.

De acuerdo a lo descrito anteriormente. Podemos deducir que este periodo de ocurrencia de sismos de tipo tornillo corresponde a una actividad volcánica de tipo freática con presencia de gases de origen magmáticos.

CONCLUSIONES

Se ha identificado 3 episodios de ocurrencia de sismos de tipo tornillo, a los cuales se le aplicó un filtro auto-regresivo con el algoritmo **Sompi**, para determinar los valores del factor de calidad **Q** del sistema resonante y la frecuencia fundamental (**f**). Los resultados de este análisis nos indican que los fluidos que estarían generando este tipo de sismos (Tornillo) están compuestos por gas, vapor de agua y agua, por consiguiente, este periodo de análisis se caracterizó por presentar una actividad volcánica de tipo freática con presencia de gases magmáticos.

REFERENCIAS

1. Alpala, R., Makario, J., Torres, R. & Cadena, O. (2013) - Análisis De Posibles fuentes generadoras De Eventos sísmicos tipo "Tornillo" En El Volcán Puracé, Colombia. Observatorio vulcanológico Y Sismológico De Popayán, Observatorio vulcanológico Y Sismológico De Manizales, Observatorio vulcanológico Y Sismológico De Pasto. 22 P.
2. Torres, R.A., Gomez, D.M. & Gomez, M.L. (1996) - Unusual seismic signals associated with The Activity at galeras volcano, Colombia, From July 1992 To September 1994. *Annali Di Geofisica*, Vol. 39, N. 2, March 1996, 299-310 P.
3. Seidl, D., Hellweg, M., Rademacher, H., Gomez, D. & Torres, R. (1999) - The Anatomy Of A Tornillo: Puzzles From three-Component Measurements at galeras volcano (Colombia). *Annali Di Geofisica*, Vol. 42, N. 3, June 1999, 355-364 P.
4. Delgado, R. (2012) - Estudio geológico, Petrográfico Y Geoquímico Del Complejo Volcánico Ampato - Sabancaya. Tesis de Ingeniero. Universidad Nacional De San Agustín de Arequipa, Perú, 146 P.
5. Mering, C., Huaman, R., Chorowicz, B. & Guillande, R. (1996) - New Data On The Geodynamics Of Southern Perú from computerized analysis Of Spot And Sar Ers-1 Images: *Tectonics*. 259, 153-169 P.
6. Benavente C., Carlotto, V. & Castillo, B. (2010) - Extensión En El Arco Volcánico actual del Sur Del Perú. Congreso Peruano De Geología, 15, Resúmenes. Lima : Sociedad geológica del Perú, 5 P.
7. Benavente C., Delgado, V. & Audin, L. (2012) - Estratigrafía De Las Cuencas Lacustres Colca Y Omate: Ejemplos De Paleosismicidad Y Tectónica Activa Del arco volcánico cuaternario Y Actual De Los Andes Centrales Del Sur Del Perú, 16, Resúmenes. Lima : Sociedad Geológica Del Perú, 5 P.
8. Sebrier 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 P.
9. Huaman, D., Guillande, R., Rodriguez, A., Rivera, R. & Antallaca, A. (1991) - Teleanálisis geológico Y Sismicidad Del Sector Comprendido Entre El Volcán Sabancaya Y El Poblado De Ichupampa: El Sistema De Fallas Sepina. *Inf. Int. Igp.*, 8 P.
10. Aki K., Fehler M. & Das S. (1977) - Source Mechanism Of Volcanic tremor: Fluid-Driven Crack Models And Their Application To The 1963 Kilauea Eruption. *Journal Of Volcanology And Geothermal research*, 2:259-287 P.
11. Chouet B.A. (1986) - Dynamics Of A Fluid-Driven Crack In Three Dimensions By The Finite Difference Method, *J. Geophys. Res.*, 91, 13967-13992 P.
12. Chouet B.A. (1988) - Resonance Of A Fluid-Driven Crack: Radiation Properties And Implications For The Source Of Long-Period Events And Harmonic Tremor, *J. Geophys. Res.*, 93, 4375-4400.
13. Chouet B.A. (1996) - Long-Period volcanic seismicity: Its Source And Use In Eruption Forecasting. *Nature* 380, 309-316 P.
14. Kumagai H. & Chouet B. (1999) - The Complex Frequencies Of Long-Period Seismic Events As Probes Of Fluid Composition Beneath volcanoes, *Geophys. J. Int.*, 138, F7-F12
15. Kumagai, H. & B. Chouet (2000) - Acoustic properties Of A Crack Containing Magmatic Or Hydrothermal Fluids, *J. Geophys. Res.* 105(B11), 25,493- 25,512 P.
16. Kumagai, H. & B. Chouet (2001) - The Dependence Of Acoustic properties Of A Crack On The Resonance Mode And Geometry, *Geophys. Res. Lett.* 28(17), 3325-3328 P.

Caracterización de sismos tipo "TORNILLO" registrados durante la crisis del volcán Sabancaya (2013)



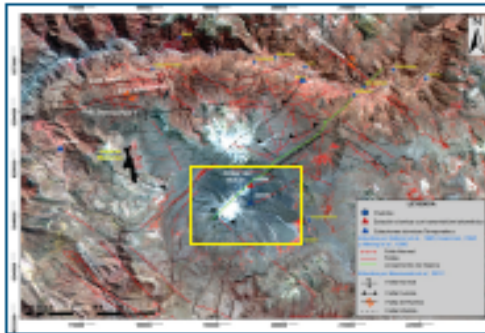
Carta geol. "Yajay E.", Análisis "C" & "L" del "A."
 "Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Colón de 1470, Lima, Perú."
 "Observatorio de Vulcanología e Instrumentación de Sabancaya, Av. 12 de Octubre # 10 - 47, Arequipa, Colombia."



Introducción

- Ubicación: Sur - Central de la provincia de Caylloma, Arequipa (Fig. 1).
- Estratovolcán Andesítico considerado activo.
- Zona de influencia: 7 poblados y entre otros con 10 000 habitantes aprox (INEI, 2007).
- Desde tiempo prehistóricos, 7 procesos eruptivos (Rodríguez & Uribe, 1994; Huamán, 1995; Antayhua et al., 2003; Alcalá, 2007 y Paxi, 2012;).

- Crisis sísmica y fumarólica del 2013.
- Eventos TORNILLO (TOR) (Fig. 2a) (Alpala et al., 2013); sismicidad encontrada en otros volcanes andesíticos y en diferentes etapas del proceso eruptivo (Fig. 2b, c) (Torres et al., 1996; Seidl et al., 1999).



RED SÍSMICA 2013
 - 04 Sensores sísmicos.
 - 03 de banda ancha y
 01 de periodo corto.

Figura 1. Mapa de Ubicación Complejo volcánico Ampato - Sabancaya - Hualca Hualca (Arequipa). El recuadro amarillo indica la zona de estudio.

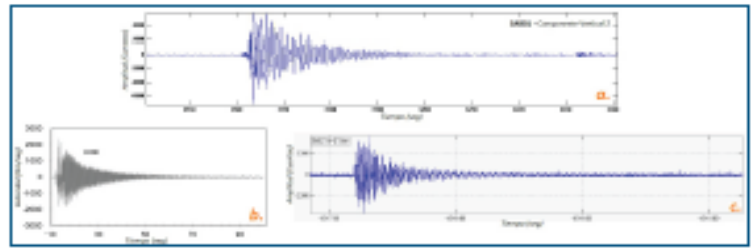


Figura 2. Ejemplo de sismos tipo Tornillo. a) Tornillo registrado en el volcán Sabancaya, Perú (2013). b) Tornillo registrado en el volcán Parí, Colombia (2010). c) Tornillo registrado en el volcán Galeras, Colombia (2012).

Volcán Sabancaya

GEOLOGÍA

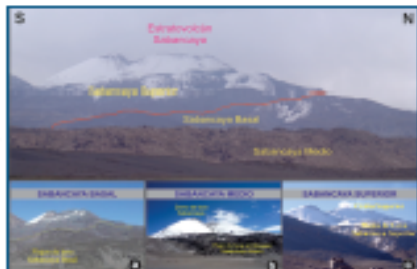


Figura 3. Vista de las 03 unidades volcánicas del volcán Sabancaya: a) Sabancaya Inferior, b) Sabancaya Medio y c) Sabancaya Superior (Delgado, 2012).

TECTÓNICA

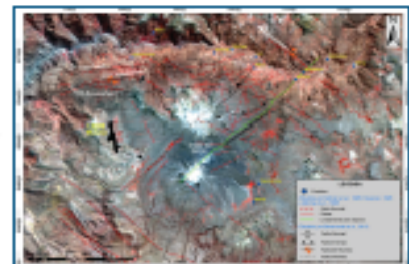


Figura 4. Principales fallas y movimientos del área de estudio. (Sábster et al., 1988; Huamán, 1995; Alberg et al., 1996 y Becerra et al., 2012).

Metodología, Datos y Procesamiento

Modelo Geométrico
 (Aki et al., 1977; Chouet et al., 1986, 1988, 1996; Kumagai et al., 1999, 2000, 2001).

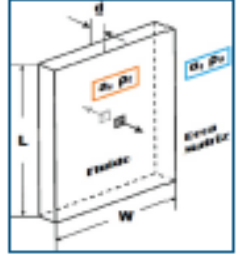


Figura 5. Modelo Geométrico de una grieta en forma de tubo (Kumagai & Chouet, 2000).

Método de Análisis Espectral SOMPI

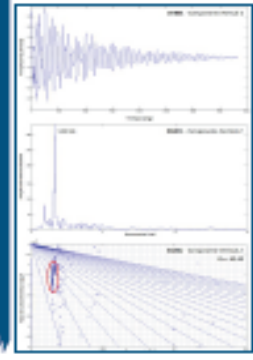
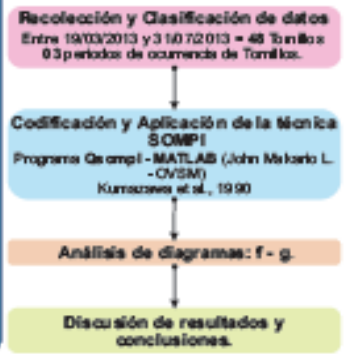


Figura 6. Diagrama de relación de los sensores para Q y f (Kumagai & Chouet, 2000).

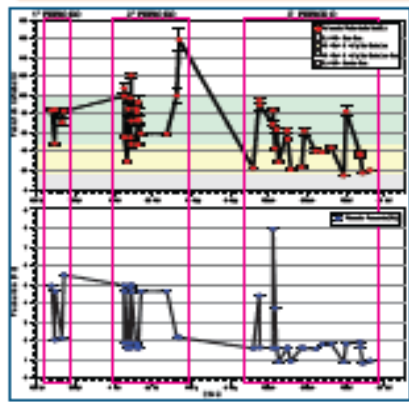
SOMPI:
 - Basada en una ecuación auto-regresiva.
 - Permite estimar la f_c y el Q_c .

Figura 7. - Tornillo registrado el día 17 de Abril del 2013 a las 21:23 horas UTC.

Datos y Procesamiento



Discusión de resultados



Se identificaron:
 1° Per: 20 - 25/03.
 2° Per: 17/04 - 09/05.
 3° Per: 07/06 - 22/07.
 f_c osciló entre 0.81 - 7.96 Hz, predominando en promedio los 3 Hz.
 Q_c varió entre 10 y 90 en promedio, aunque en algunas ocasiones alcanzó valores mayores a 100.

Figura 8. Verificación temporal de Q (adimensional) y f (Hz) para los eventos de tipo TORNILLO.

Conclusiones

Los resultados de este análisis nos indican que los fluidos que estarían generando los Tornillos en su mayoría están compuestos por gas, vapor de agua y agua, por consiguiente, este periodo de análisis se caracterizó por presentar una actividad volcánica de tipo freática con presencia de gases magmáticos.

Referencias Bibliográficas

Alpala, J. P., Torres, J. L., Huamán, J. C., & Becerra, J. (2013). Caracterización de sismos tipo Tornillo en el volcán Sabancaya, Perú. *Boletín de la Asociación Colombiana de Geofísicos*, 28(1), 1-12.
 Becerra, J., Torres, J. L., Huamán, J. C., & Alpala, J. P. (2012). Caracterización de sismos tipo Tornillo en el volcán Sabancaya, Perú. *Boletín de la Asociación Colombiana de Geofísicos*, 27(1), 1-12.
 Chouet, B., & Aki, K. (1977). The source mechanism of a volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 82(12), 2105-2110.
 Delgado, J. (2012). *Geología y tectónica del volcán Sabancaya*. Tesis de maestría, Universidad de Arequipa.
 Huamán, J. C. (1995). *Geología y tectónica del volcán Sabancaya*. Tesis de maestría, Universidad de Arequipa.
 Rodríguez, J. P., & Uribe, J. (1994). *Geología y tectónica del volcán Sabancaya*. Tesis de maestría, Universidad de Arequipa.
 Seidl, R., Torres, J. L., Huamán, J. C., & Alpala, J. P. (1999). *Geología y tectónica del volcán Sabancaya*. Tesis de maestría, Universidad de Arequipa.