



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

INSTITUTO GEOFÍSICO - ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INFORME ANUAL: VOLCÁN TUNGURAHUA ACTIVIDAD EXPLOSIVA EN 2010

1. Introducción

Tungurahua (1.45°S, 78.43°W, 5032m) es un estrato-volcán andesítico, ubicado en la Cordillera Real de Ecuador, a 120 kilómetros al sur de Quito. Se destaca por su forma conica, laderas empinadas y alto relieve (3200m) (Hall *et al.*, 1999). El Tungurahua es uno de los centros volcánicos más activos de los Andes ecuatorianos. Erupciones significativas, con VEI ≥ 3 , se registraron en los años 1640, 1773, 1886 y 1918, y fueron acompañadas generalmente por fuertes explosiones de lava y flujos piroclásticos, lahares y caída de tefra (Hall *et al.*, 1999; Le Pennec *et al.*, 2008). En el pasado, estos productos volcánicos afectaron pequeños poblados alrededor de la base del volcán, así como la ciudad de población de Baños, que se encuentra a sólo 8 km de la cumbre (Kumagai *et al.*, 2007).

Después de 80 años de inactividad, en Octubre-Diciembre de 1999 se inició una nueva fase de actividad se registraron columnas de gas y ceniza de al menos 7 kilómetros de altura, lo que provocó la evacuación de 26.000 personas de Baños y otros pueblos que rodean las laderas del volcán (Tobin y Whiteford, 2002; Lane et al, 2003). Desde 1999, el Tungurahua ha experimentado una serie de ciclos eruptivos, con períodos de intensa actividad en Julio-Agosto de 2006, Febrero de 2008, Enero-Marzo de 2010, Mayo-Julio de 2010 y Noviembre-Diciembre de 2010.

2. Instrumentación

Con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y dirigido por el Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) de Quito, se estableció en 2006 un proyecto de cooperación conjunta para mejorar la vigilancia sismo-acústica de la actividad volcánica del Tungurahua, a través de despliegue de una red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido (Kumagai *et al.*, 2007). La instalación se inició en Julio-Agosto de 2006, justo antes del inicio de la fase paroxística (Kumagai *et al.*, 2007). Para el año 2008, la red de vigilancia se había incrementado a cinco estaciones (BMAS, BPAT, BRUN, BBIL y BULB), con cada una a distancias de entre 5-7 km del cráter.

Cada estación consta de un sismómetro de banda ancha (Güralp CMG-40T), colocado en una base de hormigón y enterrado en la arena a una profundidad de 1-2 metros por debajo de la superficie del suelo (Kumagai et al., 2010). Los sismógrafos tienen un rango de respuesta en la banda de 60 s-50 Hz y una sensibilidad de ~ 800 V/m/s. Para la detección de ondas acústicas, se usan sensores de infrasonidos (ACO 7144/4144) con un filtro de paso bajo y una respuesta de 0,1 s a 100 Hz y están conectados a una torre de 1,5 m sobre el suelo (Kumagai *et al.*, 2011). Los datos sismo-acústicos son digitalizados mediante un registrador de digital de 24 bits (Geotech Smart24D), antes de transmitirlos a través de una serie de estaciones repetidoras a las oficinas del IG-EPN en Quito. Esto se logra mediante un sistema de telemetría digital con 2,4 y 5 GHz Wireless LAN, proporcionando un flujo continuo de datos en tiempo real. En la estación base de Quito, los paquetes de datos se convierten en archivos de un minuto de duración de SAC (Análisis Sísmico Coda) para su procesamiento y manipulación de datos.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

3. Eventos de Desgasificación Volcánica en el Tungurahua

Desde que se instaló la red de monitoreo de JICA-Instituto Geofísico, se han reconocido diferentes señales (sísmicas e infrasonido) asociadas con explosiones volcánicas, eventos tipo chugging, tremor de emisiones y bramidos. Estas señales constituyen la mayoría de las señales sismo-acústicos registradas en el Tungurahua.

Explosiones * - Las explosiones se caracterizan por una partición de su energía en la fuente, con una parte propagándose por la tierra como ondas sísmicas y otra propagándose por la atmósfera como pulsos acústicos (McNutt, 1999). Las señales de infrasonido de las explosiones se caracterizan por tener un inicio muy impulsivo y una corta duración con una atenuación casi exponencial, en cambio la señal sísmica tiene generalmente un inicio emergente y una composición de bajas frecuencias similar a un evento de largo periodo. En muchos casos las señales sísmicas tienen una componente inducida en el suelo debido a la señal de la onda acústica (Ruiz *et al.*, 2006).

Eventos Tipo Chugging - Este tremor se caracteriza por la presencia de una secuencia de pulsos en los registros de infrasonido que ocurren a intervalos más o menos constantes de tiempo. Se observa generalmente una pequeña variación en estos intervalos al inicio o al final de la secuencia, aparentando un cambio en la frecuencia de la señal, lo que se conoce como “*gliding*”. En los registros sísmicos esta señal se observa como un tremor armónico.

Tremor de Emisión - Tanto las ondas sísmicas como las de infrasonido tienen inicios emergentes y una larga duración. El tremor tiene generalmente una forma caótica con un amplio rango de frecuencias. Estas señales pueden durar algunas horas con una evolución de la amplitud antes de regresar a sus niveles de base. Las señales de tremor de emisión en el Tungurahua generalmente poseen un ruido sostenido parecido al motor de un avión (Matoza *et al.*, 2009).

Bramidos - Estas señales tienen componentes sísmicos y de infrasonido. Se caracterizan por inicios emergentes, una duración mayor a las explosiones y por amplitudes relativamente menores a las explosiones.

De estos, las explosiones tienen la mayor frecuencia de ocurrencia, especialmente durante períodos de actividad.

4. Actividad Explosiva – 2010

Durante el año de 2010, se registraron tres fases de la actividad explosiva en el Volcán Tungurahua: Enero-Marzo, Mayo-Julio y Noviembre-Diciembre (Fig. 1). En cada uno de tres períodos de actividad, se calculó una distribución de frecuencia-magnitud (FMD) para poner de relieve la relación entre el número de eventos explosivos con sus magnitudes proxy (los valores de presión acústica). Esta tendencia de tipo ley de potencia se expresa a partir de la ecuación presentada por Gutenberg y Richter:

$$\text{Log } N = a - bM$$

donde N es el número de eventos con magnitud igual o mayor de M , y a y b son constantes. Mientras que por lo general, los valores de b se considera que fluctúan alrededor de ~ 1 para las distribuciones de los sismos, en zonas con actividad volcánica se observan a menudo valores de b más altos (Wiemer y McNutt, 1997). Esta característica es asociada a la alta heterogeneidad de las rocas y a fuertes gradientes térmicos presentes en zonas volcánicas, lo que causa un mayor grado de fracturamiento a pequeña escala. Pequeñas desviaciones en el valor de b entre las fases de los períodos de actividad están asociadas con pequeños cambios en las condiciones volcánicas. Las tendencias de esta distribución en cada fase de la actividad en el Tungurahua resultó ser relativamente consistentes, cada una mostrando una tendencia a la ley de potencia con un valor proxy de la pendiente de b que fluctuó alrededor de ~ 3 .

Explosiones Por Dia En El Volcan Tungurahua (2010)

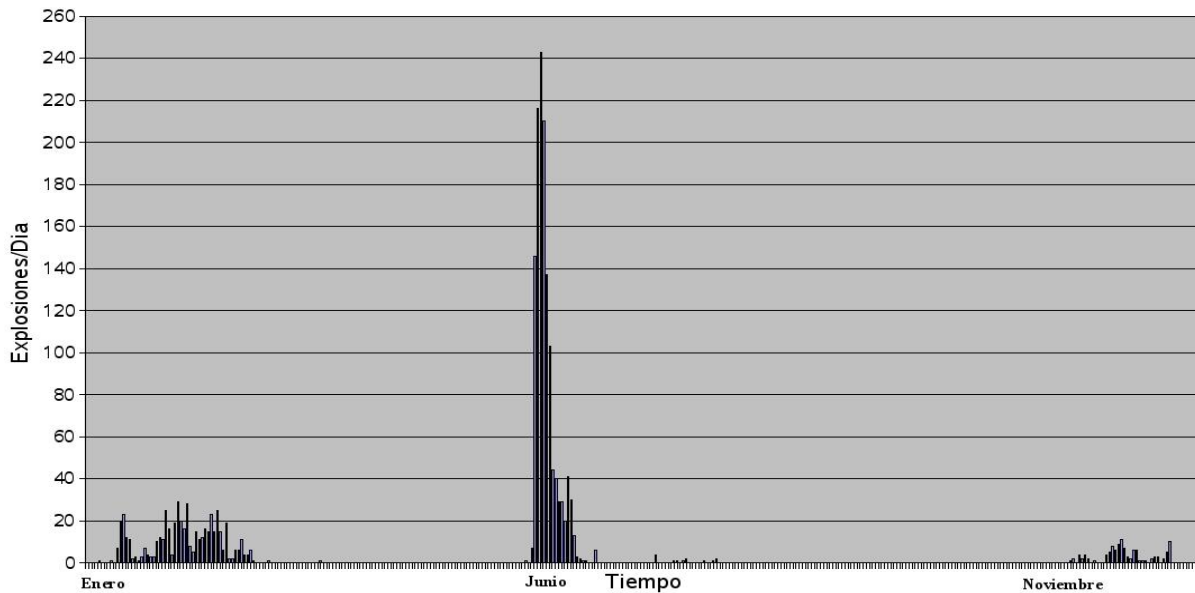


Fig. 1 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (2010).

Se utilizó el coeficiente de variación (Cv), para determinar el grado de agrupamiento entre los eventos. El Cv es dada por la ecuación:

$$Cv = \sigma / \mu$$

donde σ es la desviación estándar y μ es el tiempo medio entre las explosiones. Si el $Cv = 1$, entonces el proceso es de tipo Poisson y los eventos pueden ser tratados como distribuidos al azar a través del tiempo, mientras que si el Cv es > 1 , entonces el proceso es generalmente controlado por grupos. Cada período de actividad produjo valores de $Cv > 1.5$ (Fig. 2), lo que sugiere que hubo una fuerte agrupación de explosiones con el tiempo. El período de actividad entre Mayo y Julio de 2010 sin embargo, mostró un coeficiente de variación anormalmente grande en comparación con otros períodos de inestabilidad y pone de manifiesto un claro cambio en el mecanismo de erupción durante este tiempo.

Episodio de erupción	Número de episodio de erupción	Número de explosiones	Tiempo promedio entre explosiones (minutos)	Coficiente de variación
14 Julio 2006 – 16 Agosto 2006	EE1	118	380	4.29
25 Febrero 2007 – 18 Abril 2007	EE2	366	198	2.57
13 Julio 2007 – 10 Febrero 2008	EE3	1165	244	2.93
26 Marzo 2008 – 27 Junio 2009	EE4	822	620	4.62
05 Enero 2010 – 19 Marzo 2010	EE5	502	154	3.36
26 Mayo 2010 – 28 Julio 2010	EE6	1331	62	13.71
22 Noviembre 2010 – 25 Diciembre 2010	EE7	110	376	1.72

Fig. 2 Tabla de datos explosiones en el Volcán Tungurahua, para cada uno de los períodos de actividad entre 2006 y 2010. Esto incluye los valores del coeficiente de variación (Cv). Los períodos de actividad del 2010 se muestran en color rojo.

Los gráficos de la auto-correlación de la tasa de eventos en cada episodio de actividad muestran tendencias auto-regresivas (Fig. 3), confirmando que las explosiones no fueron distribuidas aleatoriamente a través del tiempo, aunque tampoco mostraron patrones de ciclicidad o periodicidad. Esencialmente, cada período de actividad presentó una cierta independencia de su vecino a pequeña escala, como si las condiciones volcánicas presentan un continuo cambio o evolución de un episodio de actividad al siguiente.

El índice de la relación acústica-sísmica (VASR) distingue la relación entre la energía que se propaga a través de la tierra (la energía sísmica) y la energía que se propaga a través de la atmósfera (energía acústica). Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre 1-1000 (Fig. 4), con un alto grado de dispersión de VASR, lo cual a menudo es registrado en estratovolcanes andesíticos (Varley *et al.*, 2006). En el Tungurahua en general se han encontrado altos valores de VASR que indican que una mayor proporción de energía se propaga en forma acústica y sugieren que las explosiones se iniciaron por lo general a poca profundidad en el conducto y probablemente a través de conducto abierto. Algunos valores bajos en el VASR, sobre todo ocurrieron durante las primeras fases del episodio en Mayo-Julio de 2010 lo que sugiere una alteración en el mecanismo de erupción. Durante esta fase de actividad, las explosiones probablemente se iniciaron en los niveles más profundos dentro del conducto o se iniciaron bajo un sistema volcánico más cerrado.

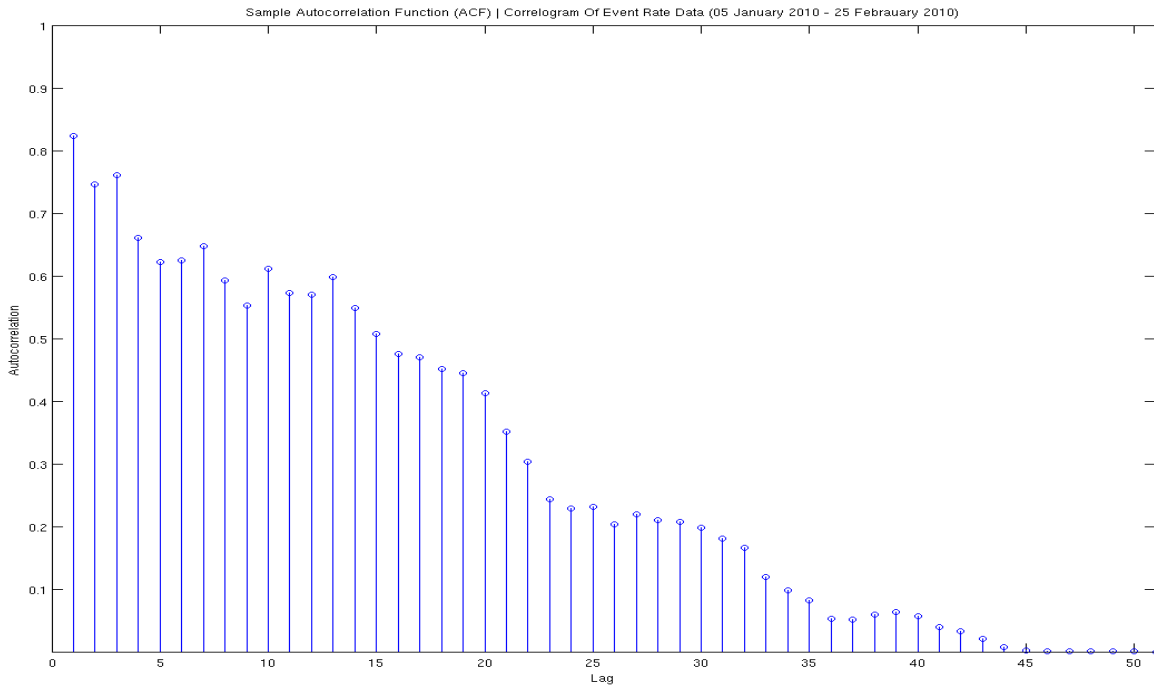


Fig. 3 Gráfico de la auto-correlación de la tasa de eventos (05 Enero, 2010 – 25 Febrero, 2010). Se muestra tendencias auto-regresivas, confirmando que las explosiones no fueron distribuidas aleatoriamente a través del tiempo, aunque tampoco mostraron patrones de ciclicidad o periodicidad.

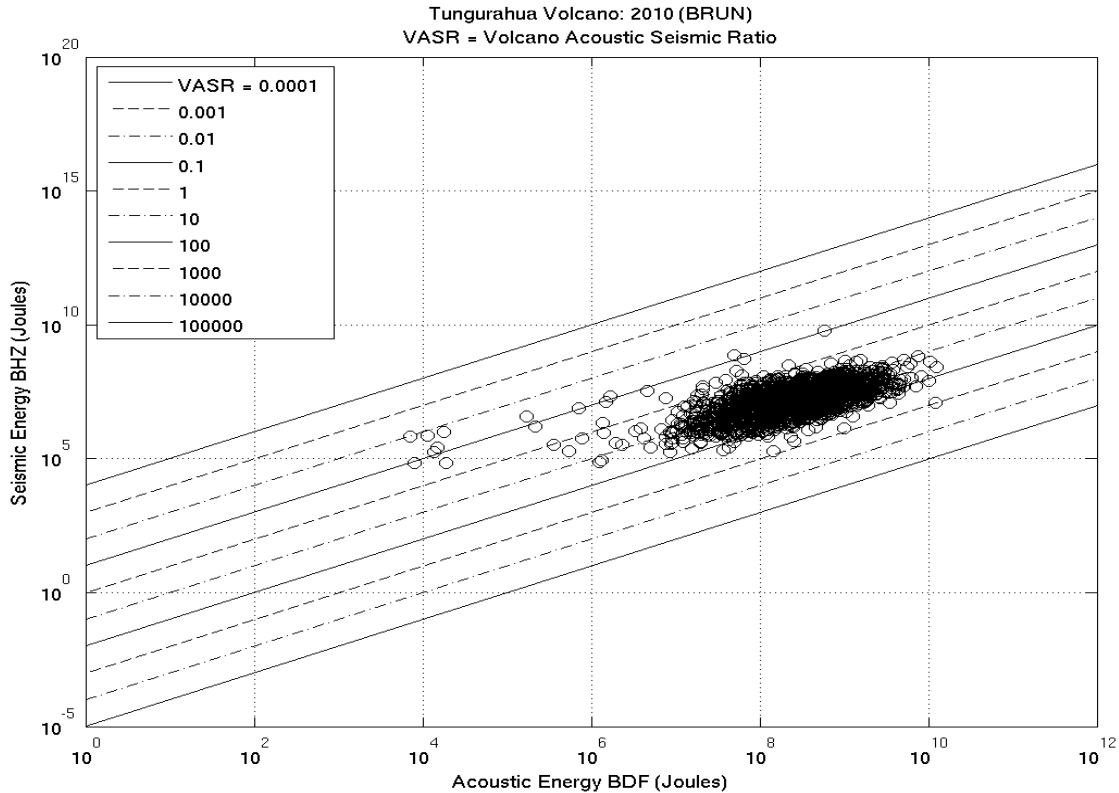


Fig. 4 Gráfico del índice de la relación acústica-sísmica (VASR) en el Volcán Tungurahua para todas las explosiones discretas en el 2010. Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre 1-1000.

4.1. 05 Enero 2010 – 19 Marzo 2010

Después de algunos meses de reposo, la actividad volcánica se reinició durante la última semana de Diciembre del 2009. La primera explosión discreta de este periodo (> 45 Pa en la traza acústica BMAS) se registró el 5 de Enero 2010. Siete explosiones se registraron el 11 de enero y desde ese día, el número diario de explosiones continuó creciendo durante todo el mes. La tasa de eventos diarios alcanzó su punto máximo en el 31 de Enero con 29 eventos. Después de esta fecha, el número de explosiones comenzó a disminuir de manera constante hasta que la actividad prácticamente terminó el 2 de Marzo del 2010. En todo el episodio de dos meses de duración, se observó una distribución en la tasa de explosión eventos de tipo Gaussiano con una típica curva de campana.

Junto con el aumento de la tasa de eventos el 11 de Enero, la energía sismo-acústica de los eventos discretos también comenzó a subir. Mientras los valores diarios de las energías media y acumulada de los señales sísmicas tuvieron su máximo en la primera parte de Enero, los valores de presión acústica no crecieron en la misma medida. La energía acústica de las explosiones discretas aumentó en cambio en forma paulatina y en el 30 de Enero recién se registró un evento con una presión acústica reducida de 1.705 Pa (a una distancia de 1 km hasta la fuente de la explosión), que es el equivalente de $\sim 132 \times 10^{10}$ Julios (J) de energía.

La energía acústica acumulada diaria, alcanzó un máximo el 11 de Febrero de 2010, con niveles de energía de $\sim 650 \times 10^{12}$ J (Fig. 5). Después de esta fecha, la energía sismo-acústica de las explosiones disminuyó rápidamente, junto con la tasa de eventos, poniendo fin a la fase principal de actividad el 2 Marzo de 2010.

Total Acoustic Energy (Joules) Per Day At Tungurahua Volcano
01 January 2010 - 19 March 2010

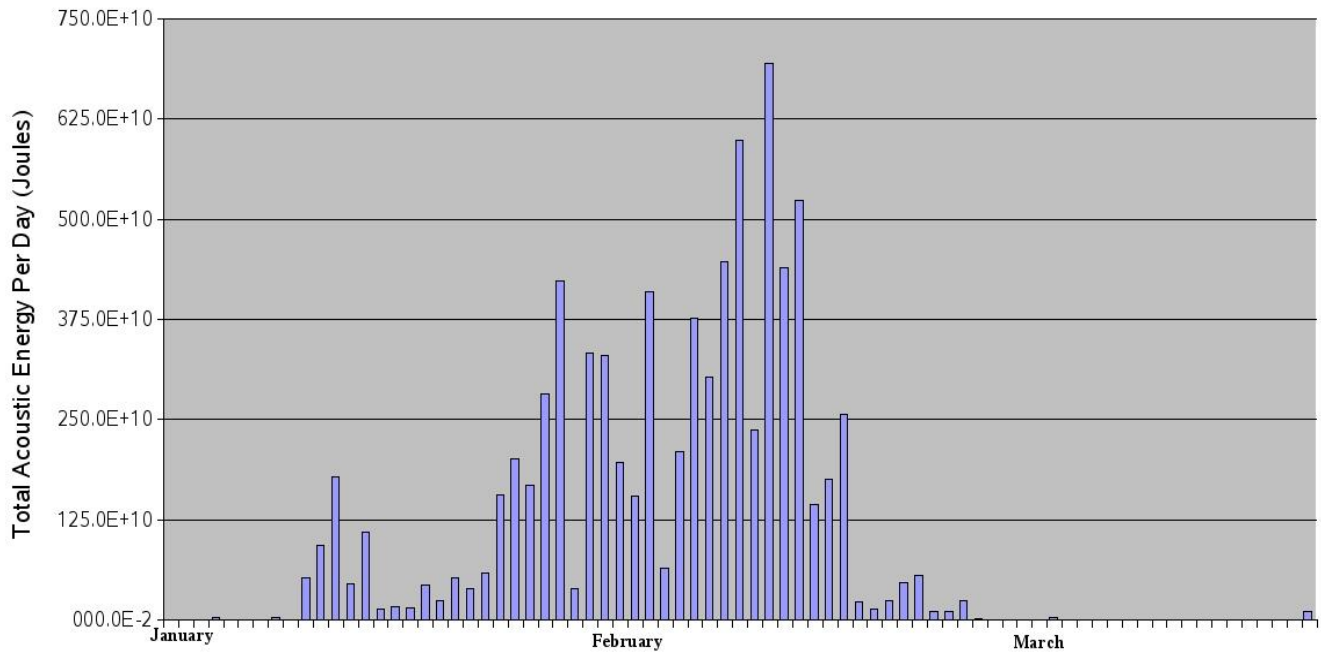


Fig. 5 La energía acústica (J) acumulada diaria en el Volcán Tungurahua (01 Enero, 2010 – 19 Marzo, 2010).

Las explosiones dispersas registradas en este periodo produjeron valores anormalmente grandes en el VASR, especialmente durante los primeros 10 días en Febrero, llegando a valores mayores a 4000 (Fig. 6). Estos altos valores de VASR que se registraron durante este tiempo, sugieren que la fuente de la iniciación explosión fue ubicándose poco a poco en niveles más superficiales dentro del conducto.

También se calculó una distribución de la frecuencia de las magnitudes, a través de todo el período produciendo una tendencia de ley de potencia con un proxy b -pendiente valor de $\sim 3,03$, y el coeficiente de variación (Cv) de los eventos tipo explosión durante el ciclo activo fue de $\sim 3,36$, mostrando una fuerte agrupación de eventos con el tiempo.

Algunas explosiones discretas continuaron apareciendo esporádicamente hasta el 19 de Marzo de 2010, antes de que la actividad explosiva haya cesado por completo.

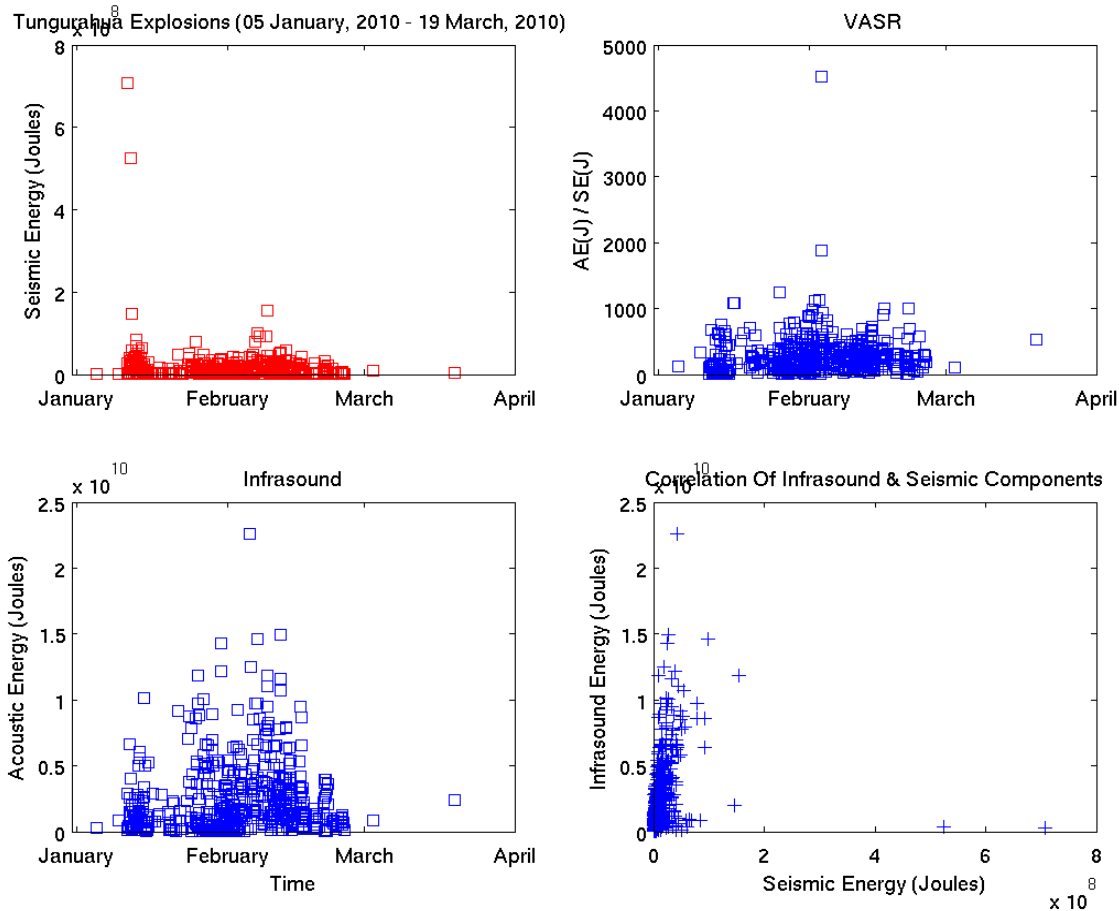


Fig. 6 Distribución temporal de las energía liberada a través del subsuelo (ondas sísmicas: panel superior izquierdo) y a través atmosfera (ondas infrasonido: panel inferior izquierdo). En el panel superior derecho se muestra la evolución temporal de la relación entre las energías acústicas y sísmicas (VASR: Índice Volcánica Acústico Sísmico). El panel inferior derecho muestra la distribución de la energía acústica con respecto a la cantidad de energía sísmica liberada.

4.2. 26 Mayo 2010 – 28 Julio 2010

El 26 de Mayo de 2010, a las 06:14 (Hora Local), se registró una explosión con alta energía sísmica y acústica en el volcán Tungurahua. La explosión se caracterizó sobre todo por muy alta proporción de energía sísmica, con un desplazamiento reducido promedio de 725 cm² (Energía ~ 573 x 10⁶ J). Este alto valor de energía sísmica sugiere que esta explosión se inició en una fuente mucho más profunda dentro del conducto, en comparación con otros eventos previamente monitoreados durante el año 2010.

Después de un día de reposo, la actividad se reanudó el 28 de Mayo de 2010, con una fuerte actividad eruptiva. Entre el 29 de Mayo y el 3 de Junio, cientos de explosiones se produjeron cada día. La tasa de eventos alcanzó un máximo de 242 eventos el 31 de Mayo. Después del 3 de Junio, la tasa diaria de explosiones disminuyó drásticamente y el 12 de Junio sólo unos cuantos eventos se produjeron por día. A diferencia de la típica distribución Gaussiana en la tasa de eventos observada en el período anterior de actividad, aquí se observa una fuerte subida y un pico en la tasa de eventos seguida por un decaimiento exponencial en el número de eventos (Fig. 7).

Las energías diarias acumuladas tanto sísmica como acústica siguieron una distribución similar a la tasa de eventos, donde las mayores cifras se observaron entre el 29 de Mayo y el 03 de Junio (con un máximo de energía diaria acumulada acústica $\sim 465 \times 10^{13}$ J), seguidas de un fuerte descenso. Los valores medios en la tasa diaria de energía sísmica y acústica sin embargo, produjeron una tendencia diferente. Entre el 28 de Mayo y el 10 de Junio, la media de energía de la explosión por día siguió aumentando, compensando el descenso del número de explosiones. Sin embargo, el mayor valor de la media diaria de la energía sísmica y acústica se registró el 26 de Mayo, debido al evento registrado ese día. Después del 10 de Junio, tanto la tasa de eventos y los valores diarios de energía acumulada y promedio de las explosiones disminuyó considerablemente.

Explosiones Por Dia En El Volcan Tungurahua (26 Mayo 2010 - 28 Julio 2010)

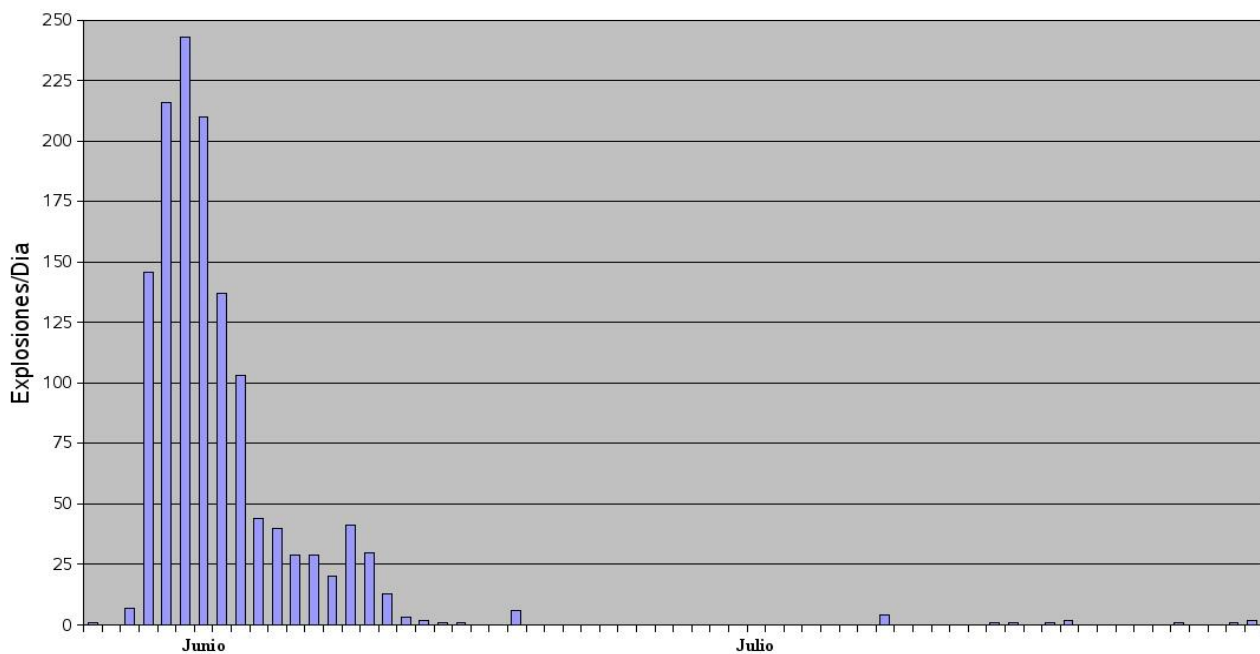


Fig. 7 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (26 Mayo, 2010 – 28 Julio, 2010).

Un proxy del valor de la pendiente b para este periodo produjo un valor de $\sim 2,94$ (Fig. 8), con un ligero descenso con respecto al episodio anterior. Esto implica que después del reposo que siguió al ciclo de explosiones de Enero-Marzo, el sistema se había vuelto considerablemente más cerrado. Además, el coeficiente de variación fue anormalmente alta ($Cv \sim 13.71$) en comparación con los demás periodos de actividad observados desde 2006, lo cual marcó un claro cambio en el mecanismo de erupción en este periodo de actividad.

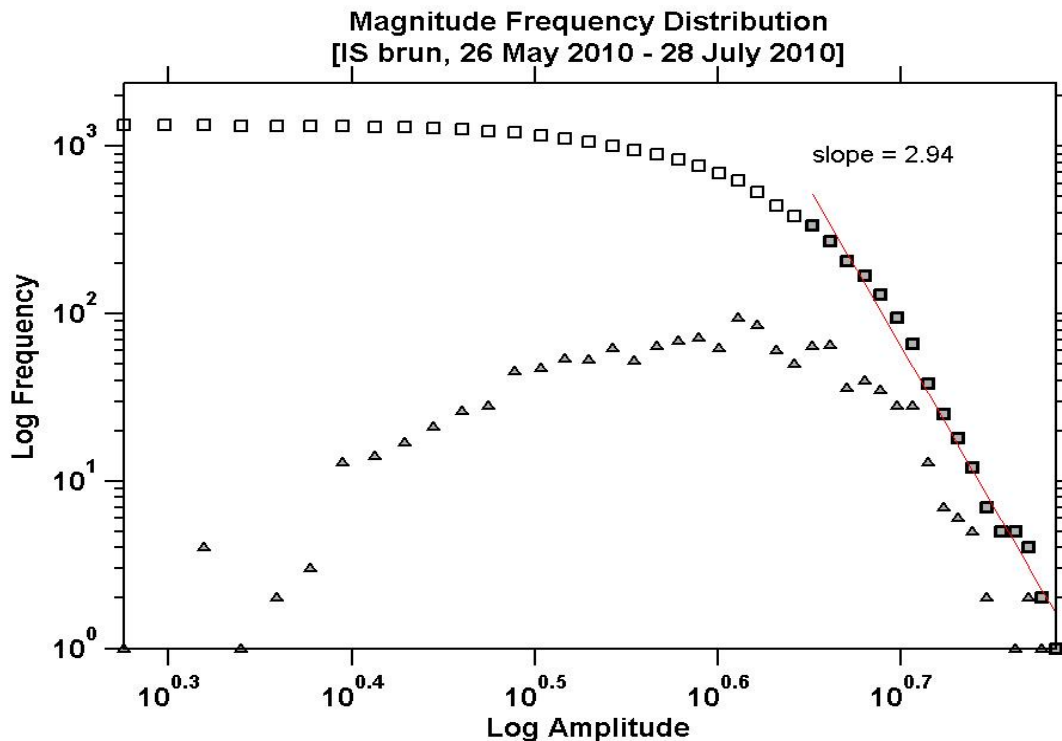


Fig. 8 Distribución de frecuencia-magnitud (FMD) para poner de relieve la relación entre el número de eventos explosivos con sus magnitudes proxy. Periodo de actividad entre 26 Mayo, 2010 y 28 Julio, 2010. Un proxy del valor de la pendiente b (slope) para este periodo produjo un valor de ~ 2.94 .

Esta variación en el mecanismo eruptivo fue analizada a través del estudio de la relación entre los componentes sísmicos y acústicos, dada por el VASR. Durante las primeras etapas de esta fase eruptiva, las explosiones presentaron valores pequeños de VASR. Esto se destacó durante la explosión del 26 de Mayo 2010 que exhibió una partición sísmica muy alta. Parece que durante las primeras fases eruptivas, las explosiones se han iniciado a partir de fuentes más profundas dentro del conducto y con un sistema más cerrado (VASR = 0.1 - 10). Después de los primeros días en Junio, los valores de VASR comenzaron a subir lo que sugiere que la desgasificación explosiva finalmente despejó el tapón, permitiendo que las burbujas de gas puedan ascender sin mayores obstáculos hacia la superficie libre y presentar explosiones con valores VASR altos (VASR = 1 - 1000). Esta secuencia de ascenso del VASR a través de un ciclo eruptivo se ha observado en los volcanes de todo el mundo (Caplan-Auerbach y McNutt, 2003). Este proceso también se observó a principios de año entre Enero y Marzo, pero a una escala mucho más pequeña.

Durante la etapa final de este ciclo eruptivo, algunas explosiones aisladas se registraron en Julio de 2010, antes de la actividad se detenga por completo en el 28 de Julio.

4.3. 22 Noviembre 2010 – 25 Diciembre 2010

En Noviembre de 2010, la actividad se reanudó con una serie de sismos volcánico-tectónicos (VT) y algunas explosiones de energía muy pequeña. La actividad explosiva sin embargo, realmente no aumentó sustancialmente hasta el 22 de Noviembre cuando se registró una explosión de mayor tamaño. La actividad explosiva duró en total un mes, entre el 22 de Noviembre y 25 de Diciembre (Fig. 9). La tasa de eventos diarios en todo el período fue baja, con lo general con sólo algunas explosiones por día y algunos días en los que no se registraron explosiones. El número diario de eventos alcanzó su punto máximo el 9 de Diciembre de 2010 con 11 eventos, luego se observó una disminución constante en el número de explosiones por día. El 25 de Diciembre de nuevo se observó un aumento en las explosiones de alta energía (10 eventos) y posteriormente la actividad se detuvo por completo.

Mientras que la energía media diaria acústica y sísmica se mantuvieron relativamente constantes en todo el período, la energía acústica acumulada y la energía sísmica diaria alcanzaron su máximo alrededor del 10 de Diciembre, debido a un aumento en el número de eventos durante este día. En comparación con los episodios anteriores de actividad, los niveles medios diarios de energía fueron relativamente consistentes con las explosiones iniciadas durante el episodio de Enero a Marzo, aunque los valores diarios acumulados de energía eran mucho más bajos que los anteriores períodos de actividad en 2010, con un máximo acumulado de energía acústica diaria que llegaba a los $\sim 400 \times 10^{10}$ Julios (Fig. 10). Esto se debe a los pequeños números de explosiones iniciadas por día durante esta fase de actividad.

Explosiones Por Dia En El Volcan Tungurahua (22 Noviembre 2010 - 25 Diciembre 2010)

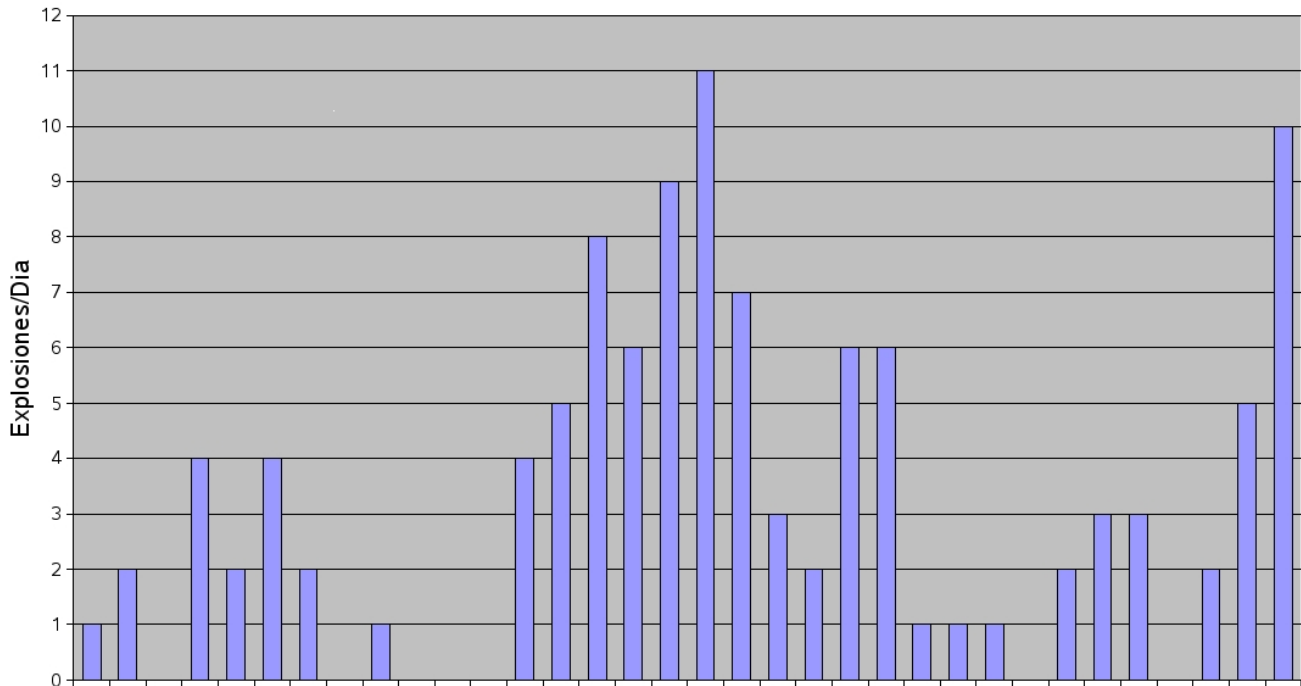


Fig. 9 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (22 Noviembre, 2010 – 25 Diciembre, 2010).

Las explosiones individuales durante Noviembre y Diciembre generalmente tuvieron similares valores de energía sismo-acústica que en el periodo Enero-Marzo, a excepción del 23 de Diciembre, cuando se registró una explosión con un valor de presión acústica de ~ 3218 Pa (grabada en una distancia de 1 km del vento), lo que equivale a $\sim 141 \times 10^{10}$ Julios de energía acústica. Esta fue la mayor cantidad de energía propagada por la atmosfera de una explosión en este periodo. La tasa de eventos y los niveles de energía de las explosiones, tanto en Enero-Marzo y Noviembre-Diciembre sin embargo, fueron considerablemente más bajos que la actividad en el periodo Mayo-Julio de 2010.

El coeficiente de variación durante esta fase de la actividad (Noviembre-Diciembre) fue de $\sim 1,72$. Este valor es parecido a los valores obtenidos en los períodos anteriores a Mayo-Julio de 2010. Los valores VASR se mantuvieron constantes en todo el período de Noviembre-Diciembre, produciendo una vez más una amplia dispersión en los valores entre 1 y 1000. Las correlaciones entre la energía sísmica y acústica, mostró una fuerte linealidad positiva de los eventos tipo explosión durante el periodo Enero-Marzo y los episodios de Noviembre-Diciembre. En Mayo-Julio sin embargo, se observó una dispersión más grande en la correlación de estos parámetros. Esto se debe al mecanismo de erupción único, a través de una abertura de un conducto más cerrado, visto en la primera fase de este episodio.

Total Acoustic Energy (Joules) Per Day At Tungurahua Volcano
22 November 2010 - 25 December 2010

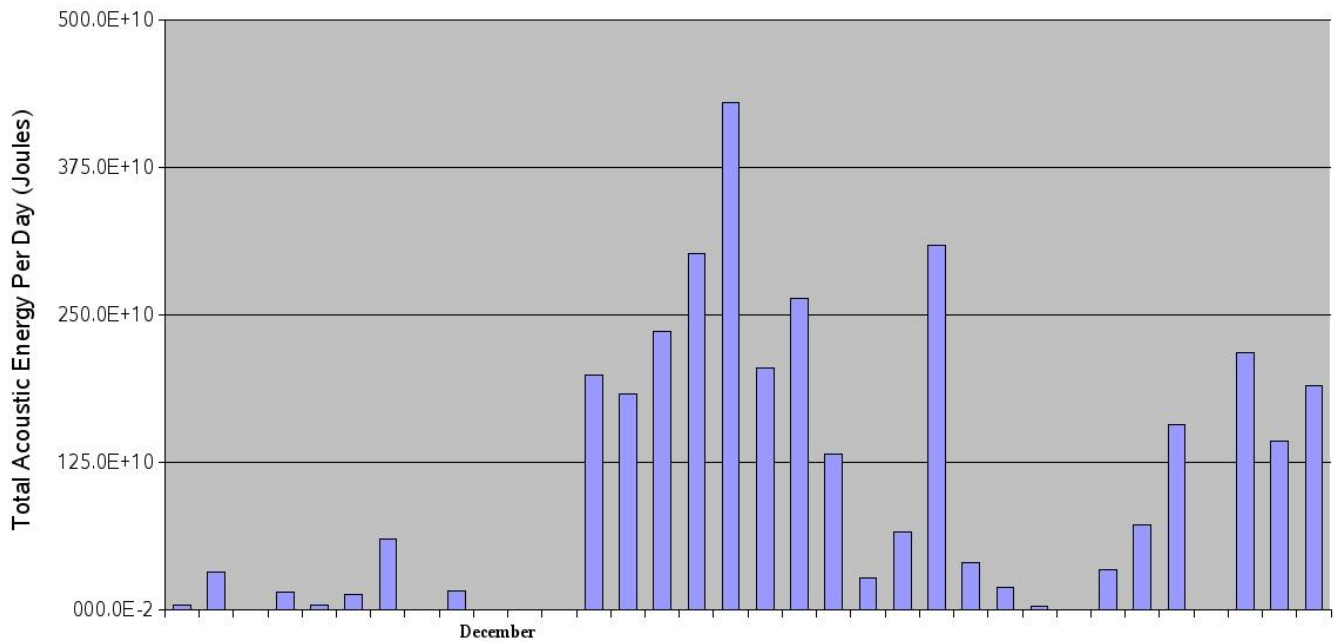


Fig. 10 La energía acústica (J) acumulada diaria en el Volcán Tungurahua (22 Noviembre, 2010 – 25 Diciembre, 2010).



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

5. Referencias

- Caplan-Auerbach, J. & McNutt, S. R., 2003. New insights into the 1999 eruption of Shishaldin Volcano, Alaska, based on acoustic data. *Bulletin of Volcanology*, **65**, 405-417.
- Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P. Monzier, M., 1999. Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **91**, 1-21.
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P., Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I. & Yamashima, T., 2010. Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches. *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08303, doi:10.1029/2010JB006889.
- Kumagai, H., Palacios, P., Ruiz, M., Yepes, H. & Kozono, T., 2011. Ascending seismic source during an explosive eruption at Tungurahua volcano, Ecuador. *Geophysical Research Letters*, **38**, L01306, doi:10.1029/2010GL045944.
- Kumagai, H., Yepes, H., Vaca, M., Caceres, V., Nagai, T., Yokoe, K., Imai, T., Miyakawa, K., Yamashina, T., Arrais, S., Vasconez, F., Pinajota, E., Garcia-Aristizabal, A., Molina, I., Ramon, P., Segovia, M., Palacios, P., Troncoso, L., Alvarado, A., Aguilar, J., Pozo, J., Enriquez, W., Mothes, P., Hall, M., Inoue, I., Nakano, M. & Inoue, H., 2007. Enhancing volcano-monitoring capabilities in Ecuador. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **88**(23), 245-252.
- Lane, L. R., Tobin, G. A. & Whiteford, L.M., 2003. Volcanic hazard or economic destitution: hard choices in Baños, Ecuador. *Environmental Hazards*, **5**, 23-34.
- Le Pennec, J. L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramon., Moreno Yanez, S., Egred, J. & Van Der Plicht, J., 2008. The AD 1300-1700 eruptive periods at Tungurahua Volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **176**, 70-81.
- McNutt, S. R., 1999. Volcanic Seismicity. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J. (eds), 1999. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1015-1033.
- Ruiz, M. C., Lees, J. M. & Johnson, J. B., 2006. Source constraints of Tungurahua Volcano explosion events. *Bulletin of Volcanology*, **68**, 480-490.
- Tobin, G. A. & Whiteford, L. M., 2002. Community resilience and volcano hazard: The eruption of Tungurahua and evacuation of the Faldas in Ecuador. *Disasters*, **26**(1), 28-48.
- Varley, N., Johnson, J., Ruiz, M., Reyes, G. & Martin, K., 2006. Applying Statistical Analysis to Understanding the Dynamics of Volcanic Explosions. In: Mader, H. M., Coles, S. G., Connor, C. B. & Connor, L. J. (eds), 2006. *Statistics in Volcanology*. Special Publications of IAVCEI, **1**. Geological Society, London, 57-76.
- Wiemer, S. & McNutt, S. R., 1997. Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mount Spurr, Alaska. *Geophysical Research Letters*, **24**(2), 189-192.