



INSTITUTO GEOFÍSICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

INSTITUTO GEOFÍSICO - ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INFORME ANUAL: VOLCÁN TUNGURAHUA ACTIVIDAD DE TREMORES DE EMISIÓN EN 2011

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 que se destaca por su forma cónica, 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, flujos de lava, 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.

Después de 80 años de inactividad, en Octubre-Diciembre de 1999 se inició una nueva fase de actividad con 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 de la 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 del Tungurahua, a través de la instalación 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 (Fig. 1).

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 $\sim 800 \text{ V / m / s}$. 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.

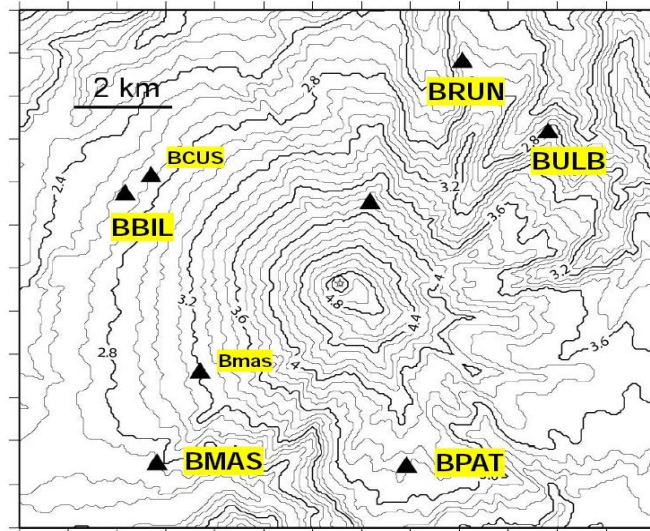


Figura 1. La red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido en el volcán Tungurahua.

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-acústicas 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 (Fig. 2), 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 (Fig. 2). 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.

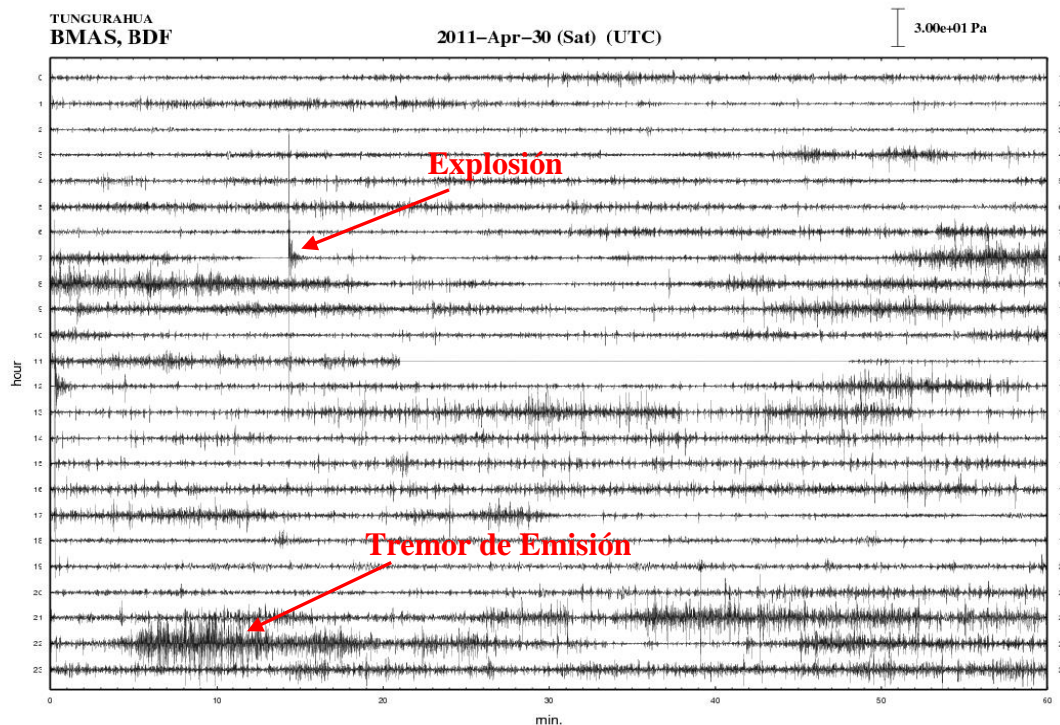


Figura 2. Registro de infrasonido del volcán Tungurahua (estación BMAS) del 30 de Abril del 2011, mostrando un típico ejemplo del apareamiento de los tremores de emisión en medio de una fase explosiva.

4. Actividad de tremores de emisión - 2011

En este año se registraron dos periodos de actividad de tremores de emisión: Abril-Mayo y Noviembre-Diciembre. En los periodos, la fase principal de actividad duró 12 días. Se determinaron los valores de la raíz del promedio de los cuadrados (RMS) y la energía (en Julios) de las señales sísmicas y acústicas en la estación BMAS a 5,5 km del cráter. La distribución temporal de estos parámetros muestra la misma tendencia temporal. Los valores de energía acústica fueron típicamente tres órdenes de magnitudes mayores que las energías sísmicas correspondientes. En estos dos periodos se calcularon las energías sísmicas y acústicas de ventanas de 10 min de tremor con valores generalmente menores a $\sim 3 \times 10^9$ Julios (Fig. 3).

Entre Abril y Mayo, solo en contados días se registraron valores grandes de energía acústica, especialmente en el 26 de Abril y entre el 28 y el 30 del mismo mes. En Noviembre y Diciembre, los niveles de energía anormalmente grandes se registraron el 04 de Diciembre, con la energía acústica llegando a más de $\sim 1,5 \times 10^{10}$ Julios (Fig. 3). Durante este día, los valores altos en energía sísmica-acústica del tremor se encontraron que coinciden con valores anormalmente grandes de energía sismo-acústica de los eventos de explosiones.

Para los dos periodos de actividad, las amplitudes del espectro (máximo pico) también muestran tendencias temporales similares a las exhibidas por la energía liberada y la amplitud RMS. Una vez más, en Abril-Mayo, los valores subieron al final de Mayo, mientras que la actividad en Noviembre-Diciembre mostró un claro aumento en las amplitudes sísmicas y acústicas el 04 de Diciembre.

En Abril-Mayo, la frecuencia de tremor (máximo pico) se mantuvo relativamente constante. Las frecuencias sísmicas se encontraron por lo general entre $\sim 1,5$ y 2 Hz, con solo unos pocos días aislados de muy bajas o altas frecuencias, lo que se observa hacia el final de la fase activa, entre el 16 y 23 de Mayo. Las frecuencias acústicas se encontraron entre $\sim 0,5$ y 1 Hz con algunos valores anormalmente bajos al final de Mayo.

Durante la actividad en Noviembre y Diciembre, las frecuencias acústicas de los tremores fueron coherentes en todo el episodio, con valores entre $\sim 0,5$ y 1 Hz, mientras que las frecuencias sísmicas se encontraron entre $\sim 1,5$ y 2 Hz, lo cual es similar a lo registrado en Abril-Mayo. Algunos eventos aislados mostraron valores excepcionalmente altos en las frecuencias sísmicas, con un evento que tiene una frecuencia de > 9 Hz. Típicamente, las frecuencias más bajas del tembor se producen cuando la presión volcánica se acumula, mientras que las frecuencias más altas se asocian con la ocurrencia de emisiones.

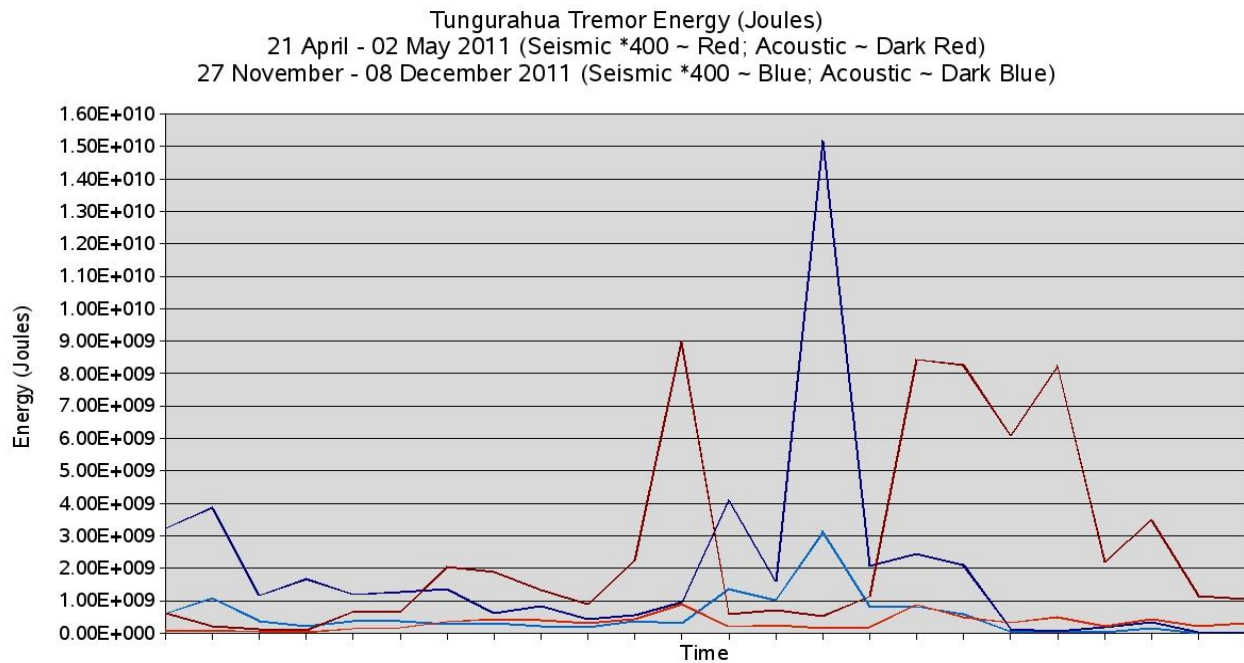


Figura 3. Distribución de energía del tembor de emisiones en el volcán Tungurahua, del 21 de Abril – 02 de Mayo, 2011 (Rojo) y el 27 de Noviembre – 08 de Diciembre, 2011 (Azul), en parámetros sísmicos y acústicos.

4.1. 21 de Abril del 2011 – 23 de Mayo del 2011

Los primeros periodos de tremores de emisión en 2011 comenzaron el 21 de Abril, durante el inicio de una nueva fase en la actividad explosiva. La fase principal de la actividad se prolongó a través de un periodo de 12 días, entre el 21 de Abril y el 03 de Mayo. La actividad se incrementó de nuevo el 17 de Mayo, con una duración total de 7 días, aunque los niveles de energía sísmica-acústica fueron considerablemente más bajos durante este tiempo. El tembor desapareció el 23 de Mayo del 2011.

Las tendencias temporales de distribución de energía sísmica, RMS y la amplitud del espectro fueron coherentes en todo el periodo. Un pico de energía sísmica se observó el 26 de Abril, con un valor $\sim 2,27 \times 10^6$ Julios, que corresponden a una amplitud del espectro sísmico de $\sim 4,11 \text{ um}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$ (Fig. 4). La actividad también subió de nuevo al final del mes en el 28 de Abril. Aparte de estos días aislados, en general, los valores de energía sísmica se mantuvieron debajo de $\sim 9 \times 10^5$ Julios. Al final de la fase activa, entre el 17 y 23 de Mayo, los valores rara vez superaron los $\sim 3 \times 10^5$ Julios como resultado de la disminución del número de tremores.

Los valores acústicos de energía entre Abril y Mayo también mostraron una tendencia similar con picos y valles que siguieron a los valores sísmicos (Fig. 5). En general, la energía acústica es aproximadamente tres órdenes de magnitud mayor que los valores sísmicos para el mismo evento. Una vez más, un pico en la energía acústica tremor se observó el 26 de Abril, alcanzando $\sim 8,97 \times 10^9$ Julios (la amplitud del espectro acústico de $\sim 34,02 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$). A diferencia de los valores de energía sísmica, la energía acústica se mantuvo alta entre el 28 y 30 de Abril, mientras la energía sísmica solo se mantuvo gran parte del 28 de este mes. En general, la frecuencia (máximo pico) de los tremores se mantuvo relativamente constante en la mayor parte del periodo. Durante la fase principal en el tremor (21 de Abril - 03 de Mayo), las frecuencias sísmicas fluctuaron entre $\sim 1,5$ y 2 Hz, mientras que los valores acústicos oscilaron entre $\sim 0,5$ y 1 Hz.

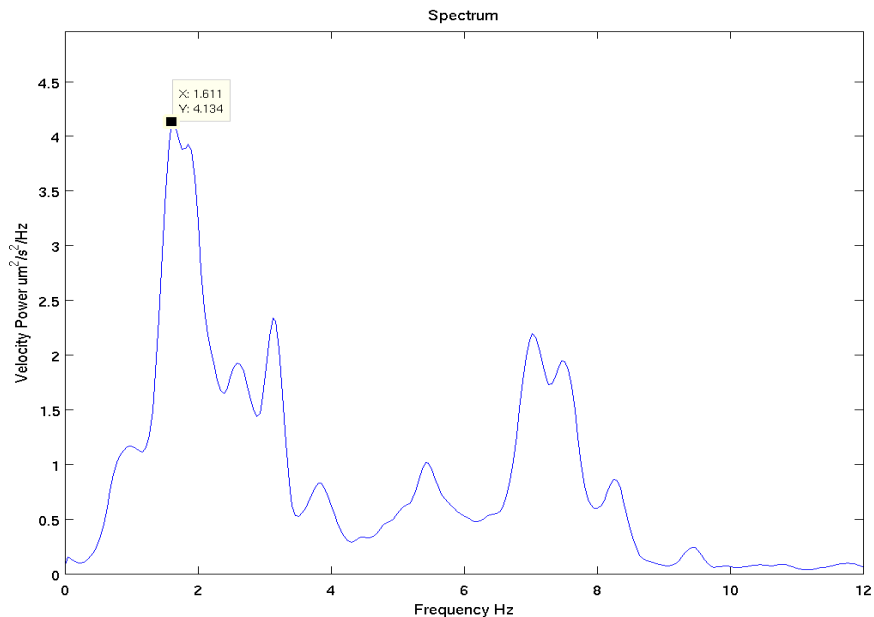


Figura 4. El espectro sísmico de eventos tremor en el volcán Tungurahua (26 de Abril, 2011), con el máximo pico de frecuencia y amplitud sísmica.

Seismic Energy (*400 ~ Blue) & Acoustic Energy (~ Red). Of Tremor Events At Tungurahua Volcano (April 21 - May 23, 2011)

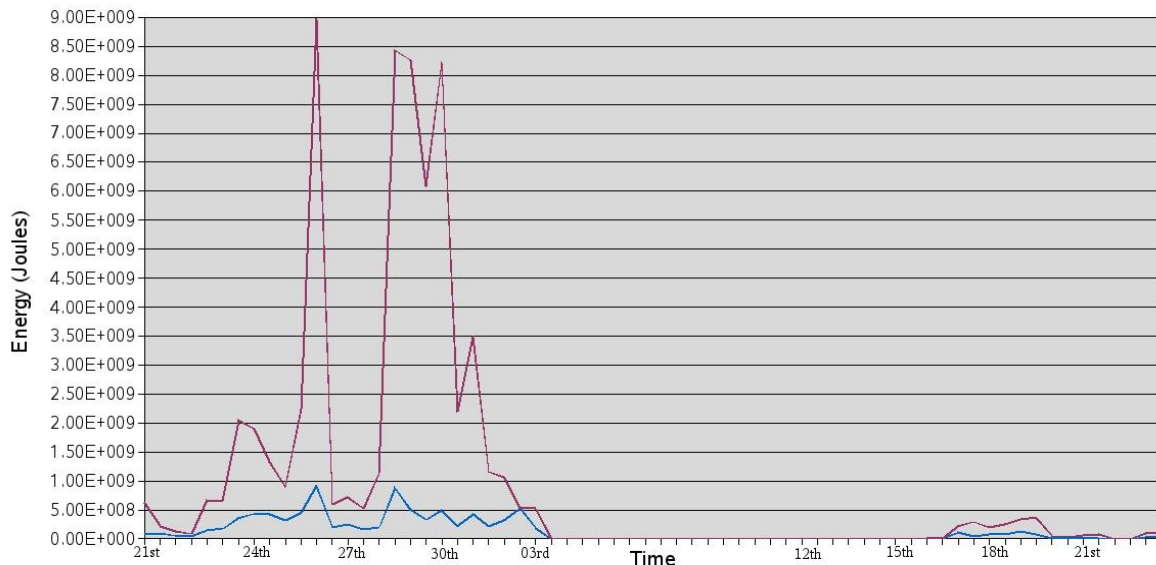


Figura 5. Energía de sísmica (azul; *400) y acústica (rojo), de tremores en el volcán Tungurahua (21 de Abril – 23 de Mayo, 2011).

Entre los 16 y 23 de Mayo, la frecuencia sísmica comenzó a fluctuar más drásticamente. En general, los días de baja frecuencia sísmica fueron seguidos por días con los niveles de frecuencia anormalmente grandes. Esto puede representar un ciclo de acumulación de presión (baja frecuencia), seguido por emisión de desgasificación (alta frecuencia). Este patrón se produjo al menos dos veces durante las etapas finales de la actividad en Abril-Mayo (Fig. 6).

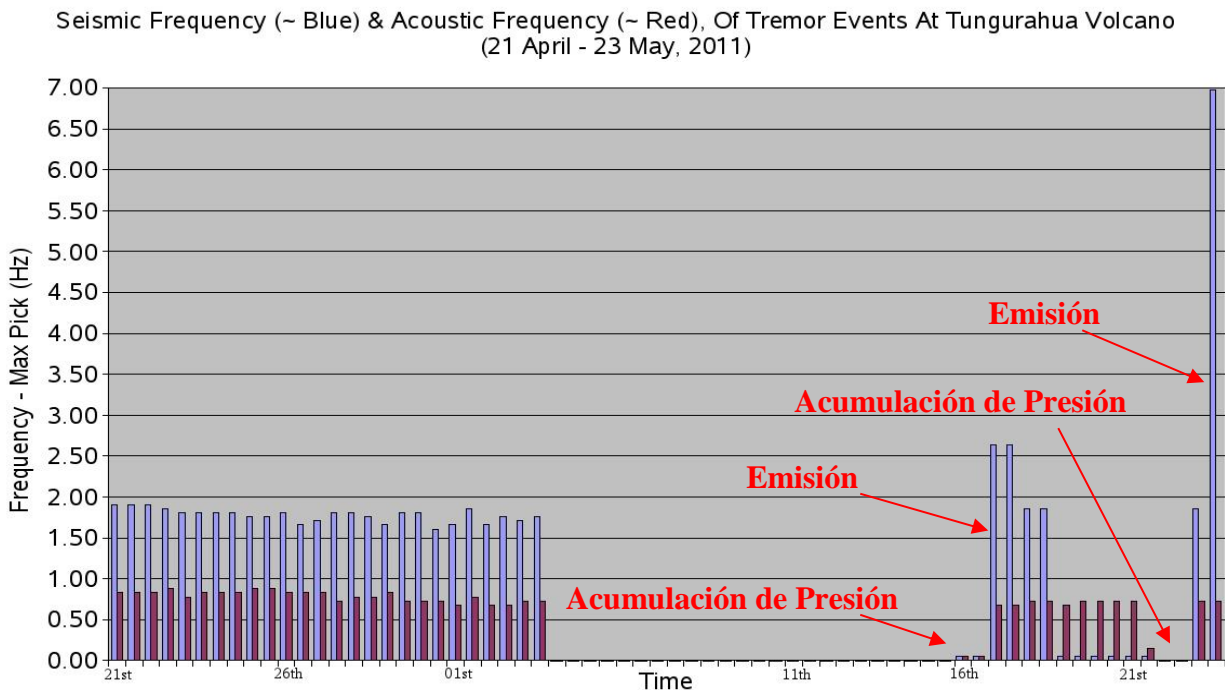


Figura 6. Máximo pico de frecuencias de espectro sísmico (azul) y acústico (rojo) de tremores en el volcán Tungurahua (21 de Abril – 23 de Mayo, 2011).

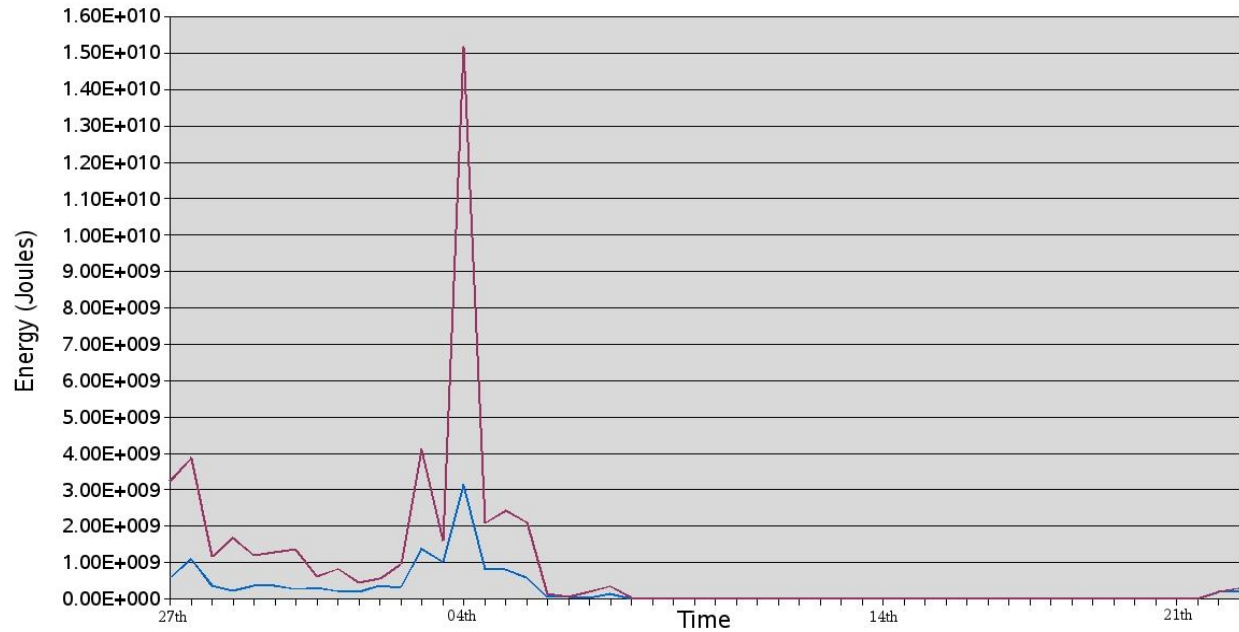
4.2. 27 de Noviembre del 2011 – 22 de Diciembre del 2011

Los tremores de emisión comenzaron de nuevo el 27 de Noviembre, el mismo día que retornó la actividad explosiva. El tremor se registró durante 12 días consecutivos, entre el 27 de Noviembre y el 08 de Diciembre. El 22 de Diciembre se produjo un retorno a la actividad tanto de explosiones y de tremor antes de terminar completamente la actividad (Fig. 7).

La energía sísmo-acústica del tremor en todo el periodo fue más alta entre el 03 y el 05 de Diciembre. Esta actividad alcanzó su punto máximo el 04 de este mes, con un tremor que liberó una energía acústica de $1,52 \times 10^{10}$ Julios – el evento de mayor energía en todo el año. Esto se correspondió con una amplitud del espectro acústico de $39,33 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$ (Fig. 8). La energía sísmica del tremor alcanzó un máximo el 04 de Diciembre ($7,82 \times 10^6$ Julios). La energía de los parámetros acústicos y sísmicos disminuyó rápidamente después del 05 de Diciembre y se mantuvo baja durante el resto del periodo.

El 04 de Diciembre, los valores altos en la energía sísmica-acústica de tremores de emisión también coincidieron con niveles anómalamente altos de energía proveniente de las explosiones. Los valores en energía acústica, en particular, fueron extremadamente grandes (Fig. 7), con una actividad superficial excepcional en ese día. No es sorprendente que en una época en que se consideraba que el conducto estaba abierto, se tenga que las energías de las dos explosiones y de los tremores de emisión fueran las más grandes.

Seismic Energy (*400 ~ Blue) & Acoustic Energy (~ Red) Of Tremor Events At Tungurahua Volcano
(27 November - 22 December, 2011)



Cumulative Acoustic Energy (Joules) Per Day, From Explosion Events At Tungurahua Volcano
27 November 2011 - 22 December 2011

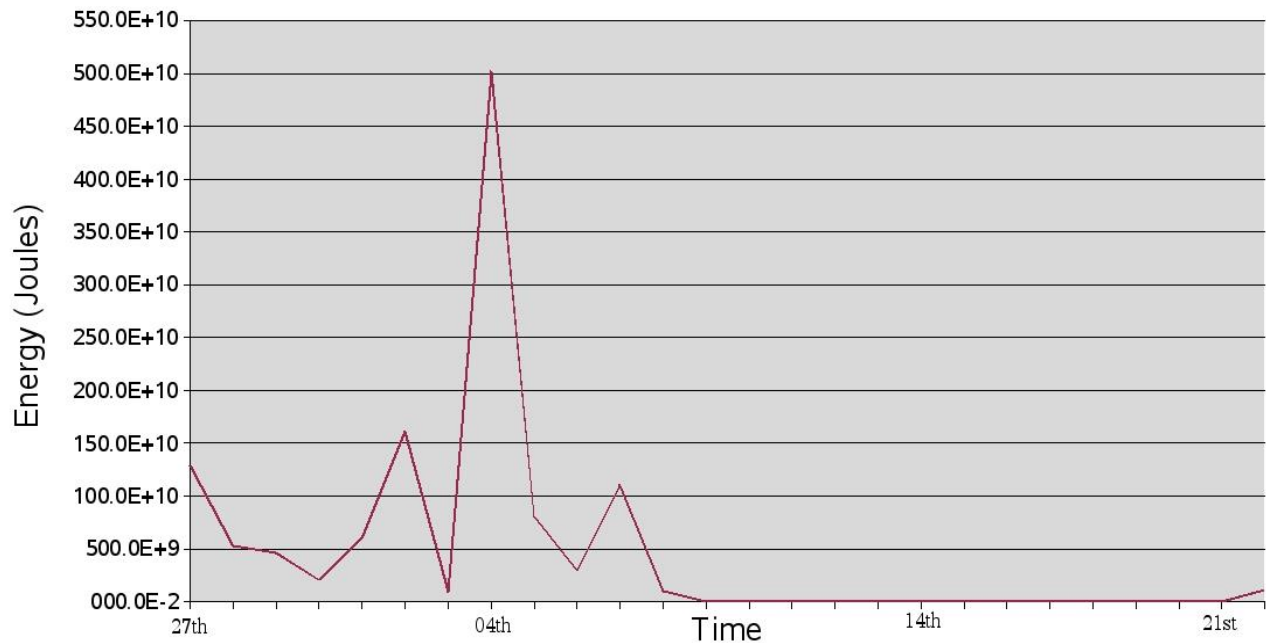


Figura 7. Superior: Energía sísmica (azul; *400) y acústica (rojo), de tremores de emisión en el volcán Tungurahua (27 de Noviembre – 22 de Diciembre, 2011). Inferior: Energía acústica diaria acumulada de explosiones en el volcán Tungurahua (27 de Noviembre – 22 de Diciembre, 2011).

Acoustic Spectrum Amplitude, Of Tremor Events At Tungurahua Volcano
(27 November - 22 December, 2011)

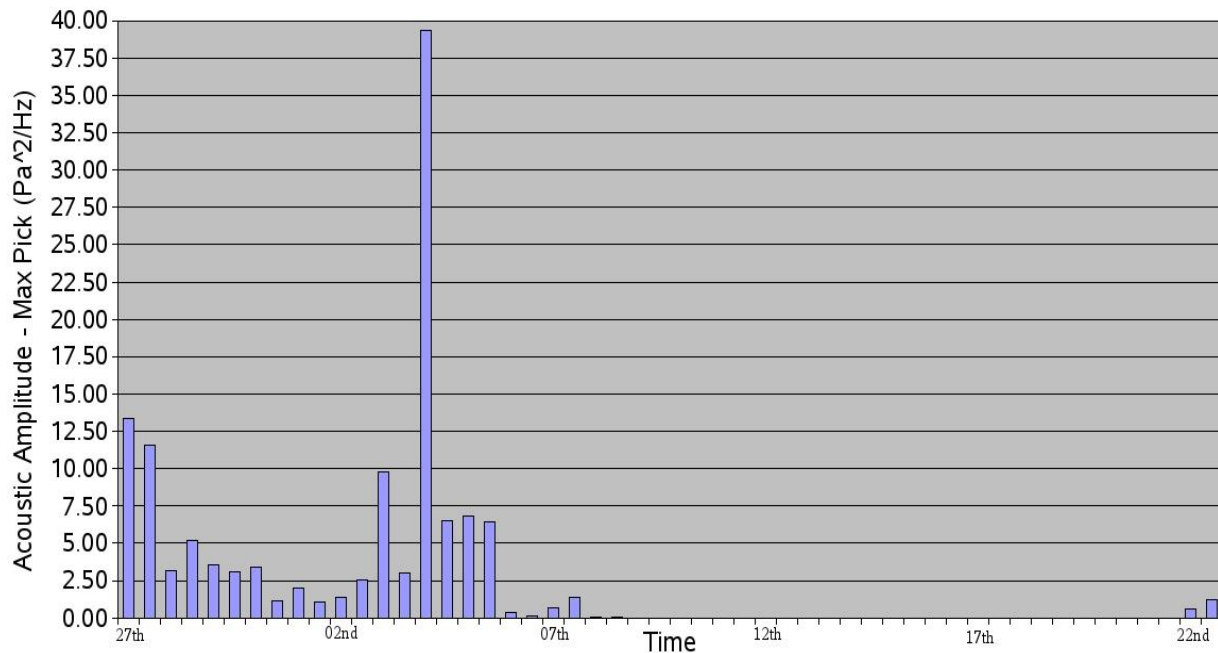


Fig. 9 Máximo pico de amplitud acústica, de eventos tremores en el Volcán Tungurahua (27 de Noviembre - 22 de Diciembre, 2011).

En general, la frecuencia de espectro acústico (máximo pico) se mantuvo constante en todo el periodo, con valores que oscilan entre ~ 0,5 y 1 Hz (Fig. 9). Las frecuencias sísmicas fueron generalmente consistentes entre ~ 1,5 y 2 Hz como era común durante la actividad en Abril-Mayo. Algunos picos, en particular de las frecuencias sísmicas se observaron, dispersos por todo el periodo, con un pico en frecuencia sísmica de tremores (máximo pico) de ~ 9,28 Hz el 08 de Diciembre.

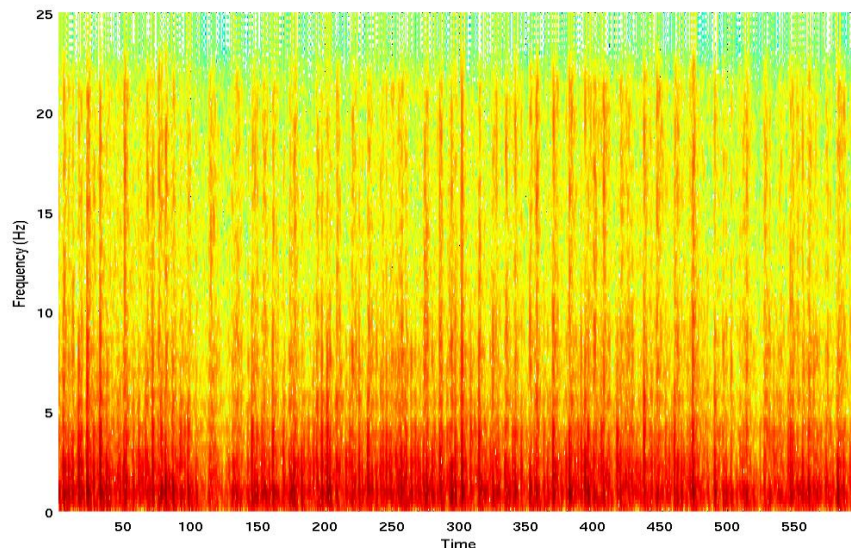


Figura 9. Espectrograma de un evento tremor de emisión en el volcán Tungurahua (04 de Diciembre, 2011). Estación: BMAS - BDF.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

5. Referencias

- 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.
- Matoza, R. S., Fee, D., Garcés, M. A., Seiner, J. M., Ramón, P. A. & Hedlin, M. A. H., 2009. Infrasonic jet noise from volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, **36**, L08303, doi:10.1029/2008GL036486.
- 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.

AS/MR
INSTITUTO GEOFISICO
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL