

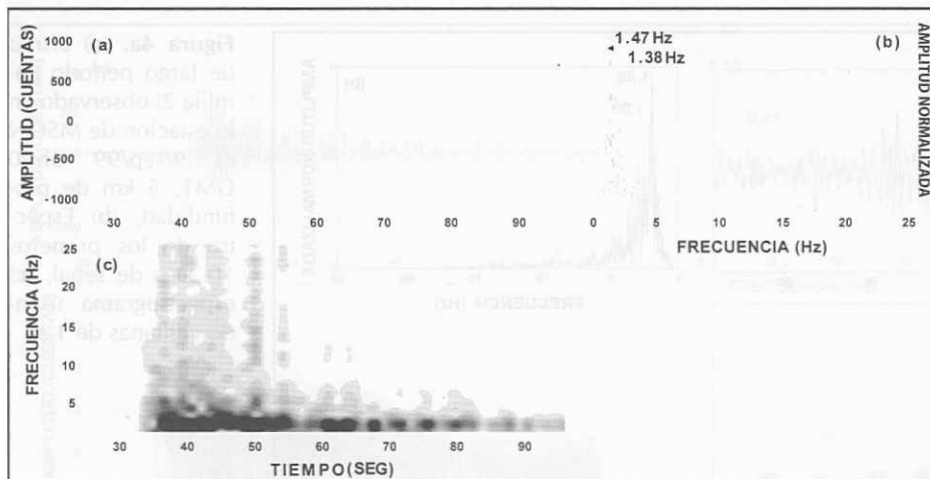


Figura 5a. (a) Sismo de largo período (familia 3) observado en la estación de Mson el 26/Jul/99 13h14 GMT, 7 km de profundidad, (b) Espectro de los primeros 40.96 s de señal, (c) espectrograma usando ventanas de 1 s.

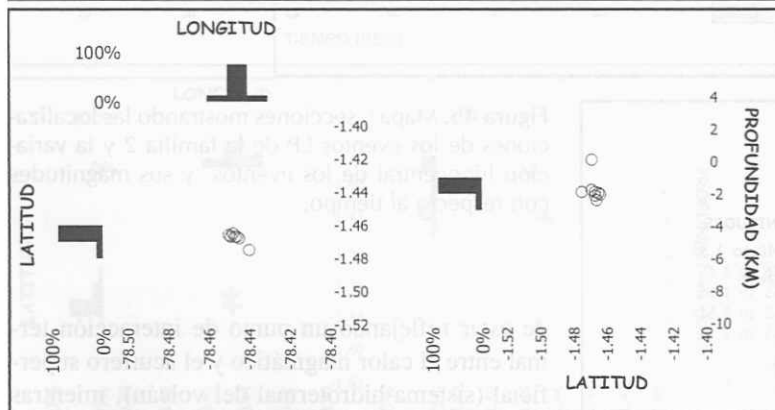


Figura 5b. Mapa y sección mostrando las localizaciones de los eventos LP de la familia 3. Se presentan los eventos con magnitudes de 2.5 a 3.

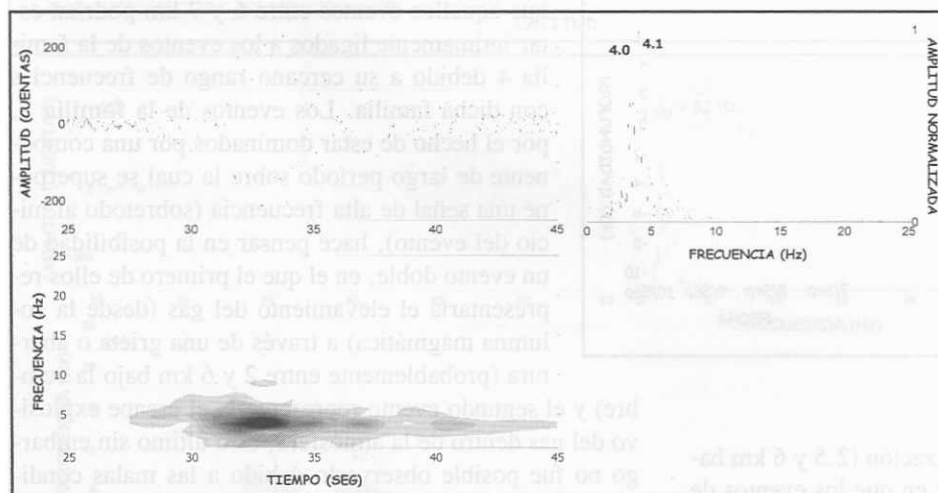


Figura 6a. (a) Sismo de largo período (familia 4) observado en la estación de RUN3 el 6/Ago/99 14h14 GMT, 7 km de profundidad, (b) Espectro de los primeros 10.24 s de señal, (c) espectrograma usando ventanas de 1 s.

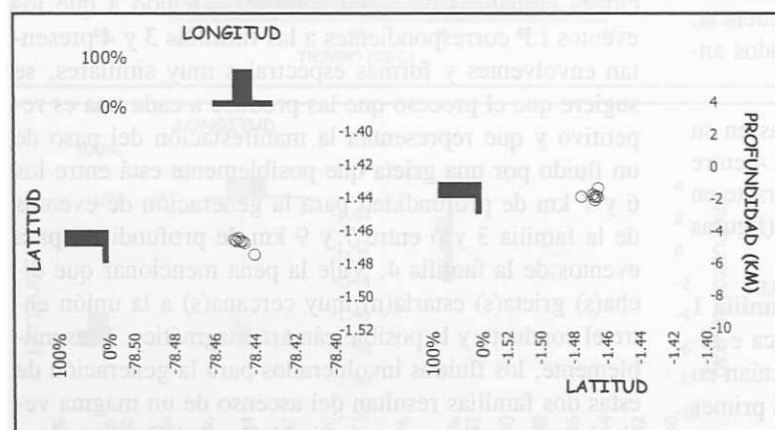


Figura 6b. Mapa y sección mostrando las localizaciones de los eventos LP de la familia 4. Se presentan todos los eventos localizados.

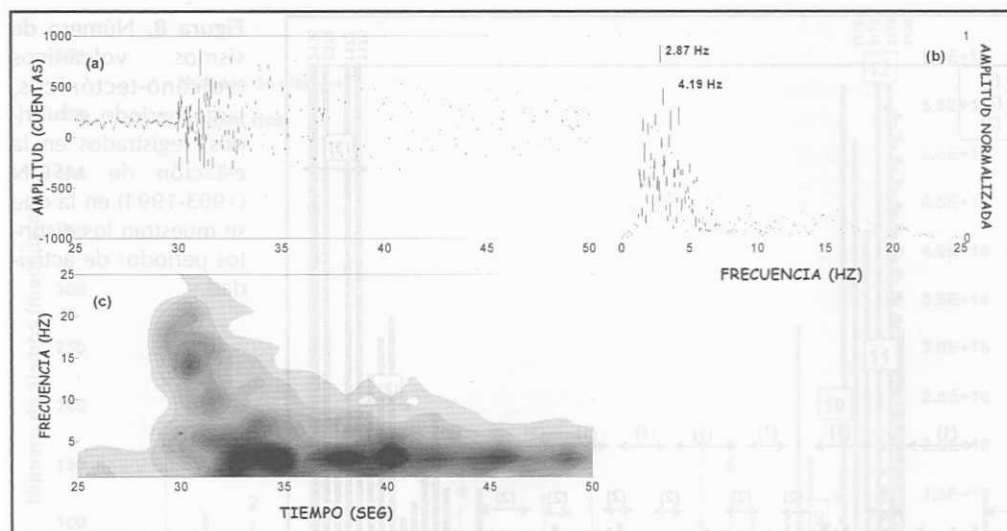


Figura 7a. (a) Sismo híbrido observado en la estación de Mson el 9/Ago/99 12h28 GMT, 6 km de profundidad, (b) Espectro de los primeros 20.48 s de señal, (c) espectrograma usando ventanas de 1 s. Observe el arribo de alta (3 s) y baja frecuencia alrededor de los 15 Hz y 3 Hz respectivamente.

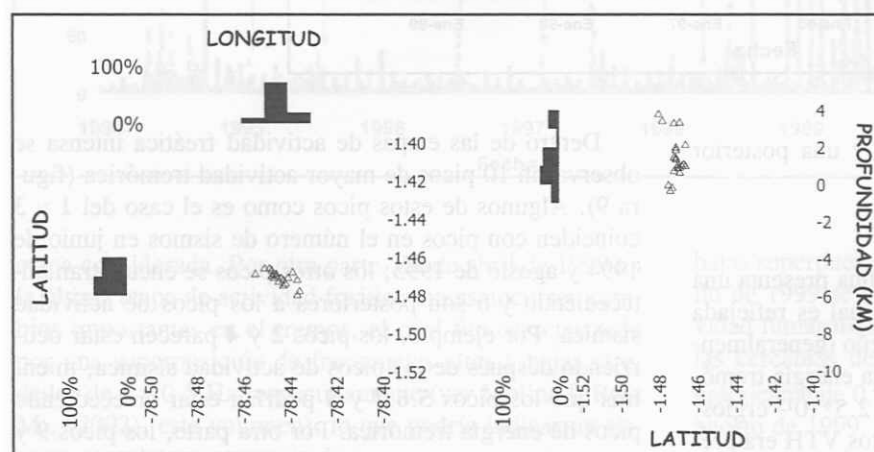


Figura 7b. Mapa y sección mostrando las localizaciones de los eventos híbridos. Se presentan todos los eventos localizados.

través de la(s) ya mencionada(s) grieta(s). Según Mangan (2000), el H_2O podría salir del magma a una profundidad tan grande como 10 km, solo si el magma: (1) se encuentra altamente saturado de gas, (2) asciende lentamente y (3) el magma contiene varios cristales sobre los cuales las burbujas se pueden formar. En el caso del Tungurahua, el alto nivel de saturación de H_2O estaría de acuerdo con los altos valores de SO_2 registrados por las medidas de COSPEC y la tasa lenta de ascenso sería reflejada por la ausencia de la emisión de una fuente de lava continua. La implicación de una alta densidad de cristales encontrados en las muestras de campo parece ser lo único que difiere de este modelo, sin embargo la baja presión dada por un conducto abierto desde julio de 1999 y la tasa lenta de ascenso podrían haber facilitado la cristalización.

Los eventos híbridos registrados en el Tungurahua, tienen las características especiales de presentar un arribo de alta frecuencia en donde se pueden distinguir las fases P y S y después de esto una coda de baja frecuencia (figura 7a). La técnica de filtrado empleada por Cramer y McNutt (1997) fue útil para distinguir estos tipos de eventos. Con dicha técnica, se notó que la alta y baja

frecuencia del evento tenían el mismo tiempo de origen y además que las amplitudes resultantes del evento al aplicar un filtro pasa-alto y un pasa-bajo eran similares, a diferencia de las amplitudes resultantes cuando se aplicaba dicho filtro a cualquier evento LP o VT. Según las localizaciones dadas por los sismos híbridos, se puede notar que existe un rango de intersección entre éstas y las dadas por los VTL y los LP de las familias 1 y 2, lo cual sugiere una relación bastante estrecha en la generación de dichos eventos (figura 7b). Sin embargo, es de notar que entre los eventos LP y HB los más superficiales son estos últimos (ya que se localizan desde 1 hasta 7 km bajo la cumbre). Debido a que los HB se encuentran muy cercanos a la fuente de generación de los sismos VT y LP, se sugiere entonces que éstos podrían ser el resultado de la fractura frágil en zonas interceptadas por grietas llenas de fluido.

ETAPAS DE ACTIVIDAD EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA

Basado en el comportamiento del tremor volcánico del Tungurahua y la ocurrencia de eventos sísmicos aislados, fue posible diferenciar varias etapas de actividad

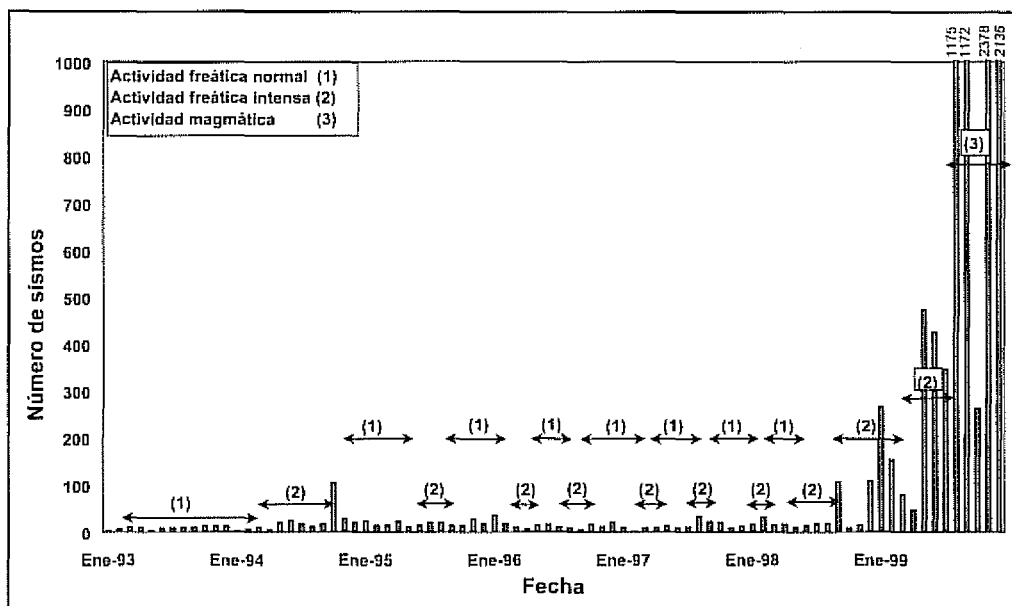


Figura 8. Número de sismos volcánicos (volcano-tectónicos, largo período e híbridos) registrados en la estación de MSON (1993-1994) en la que se muestran los distintos periodos de actividad.

freática intensa a normal intercaladas y una posterior *etapa magmática* (figura 8).

Actividad freática normal

Se consideró que el Volcán Tungurahua presenta una ciclicidad de este tipo de actividad, la cual es reflejada en un número total de sismos muy pequeño (generalmente menos de 10 eventos por mes) y/o una energía tremórica liberada pequeña que no supera los 2.5×10^{15} ergios. En toda esta etapa la ocurrencia de eventos VTH era predominante respecto a los eventos VTL.

Actividad freática intensa

Esta etapa se caracteriza por presentar un número total de sismos que supera 10 eventos por mes y 2.5×10^{15} ergios de energía tremórica liberada. La ocurrencia del número de eventos VTH suele superar a la de los eventos VTL, a excepción de 4 épocas distintas en las que sucedió lo contrario: julio y septiembre de 1996, noviembre de 1997, febrero de 1998 y agosto de 1999. El hecho de que el número de eventos VTL supere al de los eventos VTH sugiere la predominancia de los procesos de la fuente que involucra a estos dos tipos de eventos VT. Igualmente, en noviembre de 1998, enero y febrero de 1999 ocurrieron pequeños enjambres de sismos VT, LP (de la familia 1) e HB localizados entre 1 y 6 km bajo la cumbre a excepción algunos VTH localizados a profundidades mayores que 6 Km bajo la cumbre. Al parecer puede haber ocurrido una migración de hipocentros en aquella época, desde VTH profundos hasta VTH y VTL superficiales, y desde VTH profundos hasta HB y LP superficiales. En mayo de 1999 ocurre un enjambre de sismos VTH y VTL de origen superficial (entre 1 y 3 km bajo la cumbre), generalmente estos eventos fueron observados en las estaciones de Retu, Ara2, Mson y ocasionalmente en CUSU y RUN2.

Dentro de las etapas de actividad freática intensa se observaron 10 picos de mayor actividad tremórica (figura 9). Algunos de estos picos como es el caso del 1 y 3 coinciden con picos en el número de sismos en junio de 1994 y agosto de 1995; los otros picos se encuentran antecedendo y/o son posteriores a los picos de actividad sísmica. Por ejemplo, los picos 2 y 4 parecen estar ocurriendo después de los picos de actividad sísmica, mientras que los picos 5, 6, 7 y 8 podrían estar antecedendo picos de energía tremórica. Por otra parte, los picos 9 y 10 podrían anteceder el pico de actividad sísmica en mayo de 1999 y/o ser posteriores al pico de actividad sísmica en enero de 1999. Obsérvese que el pico 1 en junio de 1994 (de 8.4×10^{15} ergios) a pesar de coincidir con un pico de actividad sísmica, podría igualmente anteceder el pico de actividad sísmica en octubre de 1994 (105 eventos), lo que a su vez podría ser comparable con el pico 7 en abril de 1998 (de 9.3×10^{15} ergios) el cual está antecedendo un pico de actividad sísmica en septiembre de 1998 (108 eventos). Otros picos con energías tremóricas similares a los picos 1 y 7, como por ejemplo los picos 4 ó el 6 probablemente sugieren que el número de eventos sísmicos esperado posteriormente sea mayor que 100 como en los casos anteriores, pero se observa que la distribución normal de picos alrededor de cada pico máximo es mucho menor comparado con la distribución de picos alrededor de los picos 1 y 7, por lo cual la duración de la energía tremórica en el tiempo sería bastante importante para favorecer una mayor actividad sísmica después.

La última etapa de actividad freática intensa comprende desde noviembre de 1998 hasta julio de 1999, constituyendo así la de mayor duración desde 1994. En abril de 1999 ocurre el mayor pico (el 10) de energía tremórica liberada y luego de éste en mayo de 1999 acontece el mayor pico de actividad sísmica dentro de esta

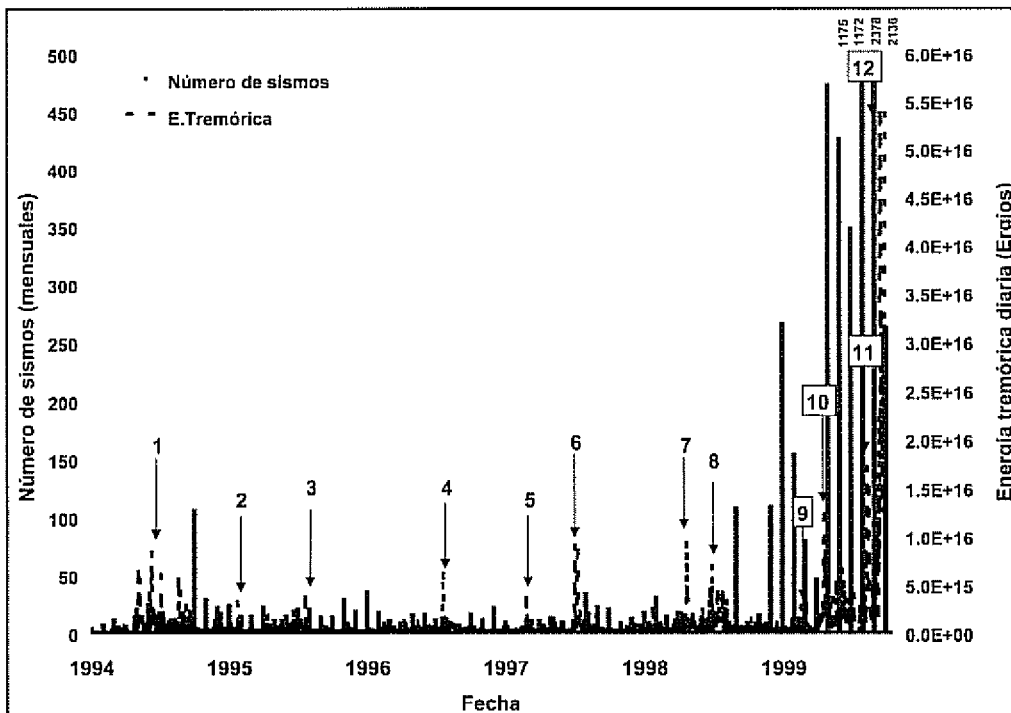


Figura 9. Variación temporal del número total de sismos y de la energía liberada por el tremor observado en la estación de MSON. Las flechas señalan los 10 picos de máxima actividad considerados dentro de la etapa de actividad freática intensa. Los picos 11 y 12 se encuentran dentro de la etapa magmática.

etapa considerada. Por otra parte, desde abril de 1999 en la última etapa de actividad freática intensa ocurren cambios importantes en el tremor, el cual fue caracterizado por una superposición de frecuencias altas y bajas alrededor de 5 y 0.5 Hz respectivamente (ver Molina I, Ruiz M., (2002), este volumen), lo que podría indicar un sistema completamente excitado.

Respecto a las localizaciones de los eventos VT en las otras etapas de actividad freática intensa y normal, vale la pena resaltar que entre noviembre de 1994 y enero de 1997 estos se localizaron entre 4 y 11 km, con hipocentros más superficiales en noviembre de 1994, más profundos entre enero y agosto de 1995 y nuevamente más superficiales entre abril de 1996 y enero de 1997. Desde febrero de 1997 a febrero de 1998 los hipocentros se restringen a profundidades entre 4 y 6 km, luego de esta fecha, entre abril y junio de 1998 ocurren hipocentros entre 8 y 12 km, y posteriormente entre diciembre de 1998 y febrero de 1999 los hipocentros se concentran principalmente entre 2 y 5 km bajo la cumbre. Finalizando la etapa de actividad freática intensa entre mayo y junio de 1999, se presentaron enjambres de sismos VT, localizados entre 1 y 5 km bajo la cumbre, escasamente dos eventos presentaron profundidades mucho mayores, uno ocurre a fines de abril de 1999 y otro en mayo de 1999. Igualmente, en enero y mayo de 1999 se presentaron enjambres-LP de la familia 1 que se localizaron entre 3 y 5 km bajo la cumbre.

Actividad magmática

Esta etapa inicia desde mediados de julio de 1999, cuando se continuaron observando frecuencias altas y

bajas superpuestas en el tremor volcánico. A fines de julio de 1999 se tienen los primeros reportes de una actividad fumarólica anómala y de un fuerte olor a azufre en las cercanías del cráter. El nivel de SO_2 aumentó, de prácticamente 0 ton/día a un pico de 714 ton/día el 16 de agosto de 1999. Adicionalmente se observó una serie de sismos pequeños de todos los tipos, lo cual caracteriza a un sistema superficial excitado por el calor de un cuerpo magmático en ascenso. Este comportamiento se mantuvo así hasta mediados de septiembre, indicando la proximidad del magma a las capas superficiales del volcán.

Por otra parte, la ocurrencia de eventos sísmicos aislados tuvo lugar en julio, agosto y septiembre de 1999. Los enjambres de sismos VT ocurridos de julio a septiembre se localizaron entre 2 y 6 km, solo un evento se localizó a 8 km bajo la cumbre. Los enjambres de sismos LP ocurrieron en distintas épocas: entre el 1 y 27 de julio los sismos del enjambre-LP (de la familia 3) se localizaron entre 6 y 7 km, luego entre el 6 y 31 de agosto los sismos del enjambre-LP (de la familia 4) se localizaron entre 7 y 9 km. Desde el 7 al 12 de septiembre los sismos del enjambre-LP (de la familia 2) presentaron una variación hipocentral desde eventos más profundos a 7 km hasta eventos más superficiales a 4 km bajo la cumbre. En agosto y septiembre, acontece el enjambre-LP de la familia 1, el cual se localizó principalmente entre 2 y 5 km bajo la cumbre, mientras que otra parte de estos eventos se localizó cerca de la zona donde se considera que existe una "válvula" (muy cerca a 7 km de profundidad) que en particular, genera eventos LP de las familias 1, 3 y 4. Los eventos HB que se presentaron entre julio y septiembre compartían una disposición hipocen-

tral similar a los eventos VT y LP de la familia 1. Al parecer los eventos HB presentaron una variación hipocentral desde eventos más profundos hasta eventos más superficiales, es decir que el 12 de agosto se localizaron entre 6 y 7 km, y posteriormente entre el 20 de agosto y 23 de septiembre estos se localizaron entre 3 y 6 km bajo la cumbre.

Adicionalmente, entre el 29 de junio y 27 de julio de 1999, se registra el valor de b más alto desde 1994, este valor fue de 2.12 ($s=0.104$). Ya hacia el 14 de septiembre, la energía del tremor aumenta considerablemente, llegando a los $2.22 \cdot 10^{16}$ ergios, lo cual fue asociado a una fuente de calor cada vez más cercana. En este mismo día ocurren una serie de emisiones de vapor y ceniza relacionadas con la señal tremórica registrada. A partir de esa misma fecha la amplitud del tremor alcanza niveles extraordinariamente altos provocando que el 5 de octubre las estaciones más cercanas del cráter (MSON y RETU) saturen su nivel de respuesta. En este mismo día se produjo la primera explosión freatomagmática que al parecer generó una nueva etapa de equilibrio caracterizada por la presencia de una columna de vapor y ceniza casi constante, que se depositó en los alrededores del cráter. El día 8 de octubre se reportaron los primeros indicios de incandescencia y con relación a las medidas de SO_2 , estos valores fueron aumentando paulatinamente desde el 4 de septiembre hasta alcanzar las 10280 Ton/día el día 9 de octubre.

A partir del 13 de octubre la energía tremórica liberada baja considerablemente, llegando a registrarse valores de $2 \cdot 10^{15}$ ergios a fines de octubre. El nivel de SO_2 continuó en niveles altos, con una tendencia a decrecer a mediados de noviembre. Lo más característico desde noviembre, es la ocurrencia de explosiones magmáticas asociadas a burbujas de gas que arrastran parte del magma produciendo una onda sonora claramente observable en los registros sísmicos, e igualmente percibida a varios kilómetros de distancia. Este tipo de actividad fue una muestra de que el magma llegó a la superficie y desde aquel momento el volcán inició una etapa eruptiva permanente de tipo estromboliano a vulcaniano, con frecuentes emisiones de gases y ceniza.

CONCLUSIONES

La actividad histórica (1640-1918) y actual nos permite inferir que el Volcán Tungurahua ha presentado una actividad eruptiva intermitente precedida por períodos de actividad freática intensa a normal, ruidos subterráneos, temblores en la cercanía del volcán, fuerte olor a azufre, incandescencia, emisión de ceniza y explosiones. Dicha actividad ha sido posible caracterizarla basándose en el comportamiento del tremor (frecuencias, amplitudes, duración) y en la ocurrencia de eventos sísmicos aislados. Por ejemplo, la aparición de frecuencias al-

tas y bajas en el tremor y la ocurrencia de eventos VT profundos (mayores a 6 km) precedieron tanto la etapa temprana de actividad freática intensa como la etapa temprana de actividad magmática.

Todo ello da lugar a perplejidades y a la constante pregunta sobre una posible relación energética entre el sistema superficial freático y el sistema magmático. Dicha relación que probablemente enmarca al Tungurahua daría lugar a una relación bidireccional entre ambos sistemas. Un ejemplo específico de ello se dio cuando la energía tremórica liberada sobrepasó $8.5 \cdot 10^{15}$ ergios en un período de 4 meses justo después del cual se produjo un número de eventos sísmicos mayor que 100.

Por otra parte, la ocurrencia de enjambres-LP (de las familias 3 y 4) localizados entre 5 y 9 km de profundidad sería otra de las señales identificadas como precursoras de la actividad magmática. Ello, más los posibles cambios que se puedan dar con el tiempo proveen un acercamiento y una herramienta útil para entender a este gran coloso que es el Tungurahua.

REFERENCIAS

- Fournier, R., 1999. Hydrothermal Processes to Movement of Fluid from Plastic into Brittle Rock in the Magmatic-Epithermal Environment. *Economic Geology. Bull. Of the Society of Economic Geologists*. 94(8), pp. 1193-1212.
- Iguchi, M., 1994. A Vertical Expansion Source Model for the Mechanisms of Earthquakes Originated in the Magma Conduit of an Andesitic Volcano: sakurajima, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*. 39(2), pp. 49-67.
- Lahr, J.C., Chouet, B.A., Stephens, C.D., Power, J.A., y Page, R.A., 1994. Earthquake Classification, Location and Error Analysis in a Volcanic Environment: Implications for the Magmatic System of the 1989-1990 Eruptions at Redoubt Volcano, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62, pp. 137-151.
- Molina I., Ruiz M., 2002b. Estudio temporal de las frecuencias del tremor volcánico del Tungurahua. En: este mismo volumen.
- Power, J.A., Lahr, J.C., Page, B.A., Chouet, B.A., Stephens, C.D., Harlow, D.H. y Murria, T.L., 1994. Seismic Evolution of the 1989-1990 Eruption Sequence of Redoubt Volcano, Alaska. *Seismological Investigations of the 1989-1990 eruption. J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62, pp. 69-94.