

CAMBIOS TEMPORALES DEL VALOR DE b : ¿POSIBLES CORRELACIONES CON LA ACTIVIDAD HIDROTHERMAL DEL VOLCÁN TUNGURAHUA?

C. Indira MOLINA P.⁽¹⁾⁽²⁾; Mario C. RUIZ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional - Quito-Ecuador

⁽²⁾ mail: cimp@terra.com.co

Palabras Clave: Volcanes, Valor de b , Tremor, Frecuencia, Energía, y Sistema hidrotermal.

El Volcán Tungurahua, localizado en la Cordillera Real del Ecuador, se encuentra desde Septiembre/1999 en estado eruptivo. Mediante el método de máxima verosimilitud con ventanas de 100 eventos sobrelapadas el 50%, se calculó el valor de b para eventos volcano-tectónicos, encontrándose cinco picos máximos: de Septiembre a Octubre/1995 $b=1.295$ ($\sigma=0.081$), de Junio a Diciembre/1996 $b=1.399$ ($\sigma=0.084$), de Enero a Febrero/1999 $b=1.370$ ($\sigma=0.083$), de Marzo a Mayo/1999 $b=1.427$ ($\sigma=0.084$), y de Junio a Julio/1999 $b=2.120$ ($\sigma=0.104$). Parece que los picos de b se encuentran antecedidos por saltos en la curva de energía tremórica, sugiriendo una posible correlación.

Durante el período estudiado, la evolución espectral del tremor volcánico muestra que existe tres grupos predominantes de frecuencias: (1) alrededor de 0.5 Hz, (2) alrededor de 2 Hz y (3) alrededor de 5 Hz. El grupo (2) es más común en el tiempo y presentó una buena correlación con las precipitaciones. En cambio los grupos (1) y (3) aparecen antes del primer pico de b en 1999. Por lo tanto, el incremento del valor de b en aquella época podría ser indicativo de un mayor flujo de calor, lo cual fue evidenciado en una actividad fumarólica mayor y en el inicio de la actividad eruptiva del volcán.

TEMPORAL CHANGES IN b -VALUES: POSSIBLE CORRELATION WITH HYDROTHERMAL ACTIVITY AT TUNGURAHUA VOLCANO?

C. Indira MOLINA P.⁽¹⁾⁽²⁾; Mario C. RUIZ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional - Quito-Ecuador

⁽²⁾ mail: cimp@terra.com.co

Key words: Volcanoes, b -Value, Tremor, Frequency, Energy and hydrothermal System.

Tungurahua Volcano, located in the Cordillera Real of Ecuador, has been in mild eruptive activity from September/1999 to the present. Using the maximum verosimilitud method with windows of 100 events overlapped by 50%, the b value was calculated for the volcano-tectonic events. Five peaks of maximum b values were recognized: from September to October/1995 $b=1.295$ ($\sigma=0.081$), from June to December/1996 $b=1.399$ ($\sigma=0.084$), from January to February/1999 $b=1.370$ ($\sigma=0.083$), from March to May/1999 $b=1.427$ ($\sigma=0.084$), and from June to July/1999 $b=2.120$ ($\sigma=0.104$). It appears that peaks of b at Tungurahua are preceded by jumps in the tremoric energy curve, suggesting a possible correlation.

During the same study period, the spectral evolution in the volcanic tremor shows that three predominate groups of frequencies exist: (1) around 0.5 Hz, (2) around 2 Hz y (3) around 5 Hz. Group (2) was most common during the time period and presented a good correlation with the precipitation regime. In contrast, groups (1) and (3) appear before the occurrence of the first peak of b in 1999. Therefore, the increase in the b value recorded in that epoch could be indicative of a larger heat flow, a situation which was evidenced through greater fumarolic activity and the beginning of eruptive activity in the volcano.

INTRODUCCION

Ishimoto e Iida (1939), Gutenberg y Richter (1944, 1949) propusieron la relación empírica entre la frecuencia de ocurrencia y la magnitud de los sismos en una ecuación logarítmica de la forma:

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

Donde M es magnitud, $N(m)$ es el número de sismos de magnitud $\geq M$ que ocurren en cierta región durante cierto período; “ a ” es una constante que depende del período de tiempo tomado y “ b ” es la pendiente de la relación denominada valor de b .

Mogi (1962) y Vinogradov (1959, 1962) estudiaron experimentalmente la relación frecuencia-magnitud de los eventos de microfractura en roca. Un resultado sorprendente fue que esta relación es la misma dada por la relación de Gutenberg y Richter en la ecuación (1). En esta relación, el valor de b es la pendiente de la recta de mejor ajuste entre el logaritmo del número de eventos observados a una magnitud dada, y la magnitud. Este valor es inversamente proporcional a la magnitud media, por lo que diferencias en el valor de b reflejan diferentes tamaños de grietas promedio que generan sismos (Power et al., 1998).

ALGUNOS VALORES DE b REPORTADOS EN EL MUNDO

Los valores de b son generalmente cercanos a 1 en muchos lugares de la corteza terrestre (Fronlich, C y Davis, S., 1994). Sin embargo en varias regiones volcánicas el valor de b suele ser mucho más alto, algunas veces muy cercano a 2. Particularmente para sismos volcano-tectónicos tipo A el valor de b es alrededor de 1.5 (Minakami, T., 1974).

Mediante el estudio experimental en muestras de roca sometidas a cargas mecánicas encuentran que los valores de b son normalmente cercanos a 1 (Mogi, K., 1962, Scholz, C.H., 1968). Por otra parte, en pruebas de laboratorio consistentes en aplicar amplios gradientes térmicos sobre muestras de roca no confinadas, se encontró que los valores de b variaron entre 1 y 3 (Warren, N., y Latham, G., 1970).

Para enjambres sísmicos el valor de b suele ser bien distinto de 1 y pueden alcanzar valores altos, cerca de 2.5 (Mogi, K., 1962). Wallace (1995) y Scholz (1968) encuentran que para enjambres sísmicos el valor de b suele ser bien distinto de 1 y pueden alcanzar valores altos (cerca de 2.5). Esto se debe a que en este tipo de fenómeno, no existe un sismo principal identificable al cual se encuentre asociada la secuencia de réplicas y por el contrario el conjunto está formado por una serie de eventos de tamaño semejante.

En el Volcán Off-Ito se encontró que las regiones que presentaban los valores más altos de b reflejaban zonas altamente fracturadas rodeando las cámaras magmáticas, mientras que los valores de b “normales” (es decir menores que 1) se encontraron en áreas circundantes (Wyss, M. et al., 1997). En la caldera de Long Valley los valores de b variaron entre 0.6 y 2, encontrándose los valores más altos cerca del domo resurgente (Wiemer, S. et al., 1998). En el Volcán Soufriere Hills el valor de b varió entre 0.5 y 1.5, dichos valores tan altos fueron explicados como el resultado de un incremento en la heterogeneidad, temperatura y condiciones de esfuerzo en el medio, mientras que los valores más bajos de b son probablemente dados por un medio menos fracturado y con menos alteración térmica. Igualmente las áreas que presentan rocas más competentes podrían soportar sismos más grandes, lo cual es reflejado por valores de b más bajos (Power et al., 1998).

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE b

Entre los factores que pueden alterar el valor de b , se encuentran: cambio en la heterogeneidad del material, es decir que el valor de b aumenta proporcionalmente con la heterogeneidad y densidad de grietas en la roca. Adicionalmente, un esfuerzo no uniforme también da lugar a valores más altos de b (Mogi, K., 1962, 1967). Un incremento en el esfuerzo de cizalla aplicado (Scholz, 1968; Urbancic et al, 1992), o un incremento en el esfuerzo efectivo disminuye el valor de b . Warren y Latham (1970) sugirieron que el fracturamiento producido por esfuerzo térmico da como resultado valores de b muy altos y una gran proporción de eventos pequeños.

DATOS

Como bien se sabe, un catálogo contiene información de períodos irregulares de tiempo de observación por lo que se presentan desviaciones importantes en la zona lineal de la regresión Gutenberg-Richter (Weichert, D., 1980; Bender, B., 1983). Para minimizar lo anteriormente dicho, los datos tomados para calcular el valor de b fueron obtenidos de la base de datos a partir del sistema analógico, ya que los registros digitales son incompletos porque los eventos muy pequeños (probablemente de magnitudes menores de 1.7) no se graban por las condiciones de detección del sistema de adquisición. Así el valor de b fue calculado con 2153 eventos clasificados como volcano-tectónicos. Las magnitudes fueron determinadas por medidas de codas de los eventos en la estación de Mson (3.2 km de distancia desde el cráter), usando la expresión:

$$M_D = a + b \log t + d\Delta \quad (2)$$

Donde α , β y δ son constantes determinadas por consideración de varios sismos referencia de magnitudes conocidas (Lee et al. (1972) encontraron $\alpha=-0.87$, $\beta=2$ y $\delta=0.0035$), τ es la duración del evento en una estación y Δ es la distancia focal del sismo a la estación.

MÉTODO Y RESULTADOS

Existen dos métodos para calcular las constantes “a” y “b” de la ecuación (1): mínimos cuadrados y máxima verosimilitud (Mogi, 1962; Aki, 1965; Utzu, 1974; Weichert, 1980). Mediante el método de mínimos cuadrados se calculó la recta de mejor ajuste a partir de la dispersión de datos que resulta de graficar $\log(N)$ vs. M , cuya pendiente b sería el valor de b y el intercepto con el eje M la constante “a” o magnitud máxima esperada (m_{\max}). Asimismo el valor de b se calculó mediante el método de máxima verosimilitud que a su vez utiliza el método iterativo de Newton-Raphson (Press, W. H., 1986) que tiene en cuenta la magnitud media regional esperada $E(m)$ descrita por Bender (1983) y el valor de b calculado por Aki (1965). Al calcular el b para todo el catálogo, se tomaron dos valores supuestos de magnitud de mínima homogeneidad (m_0), los resultados de ello muestran una diferencia muy pequeña para el mismo método (figura 1), sin embargo los valores de b calculados de un método a otro muestran una diferencia del 48% para una $m_0=1.65$ y del 62% para una $m_0=1.75$. En la figura 1, se puede observar que sobre una magnitud de 3.4, la relación de Gutenberg-Richter no es lineal, lo cual puede ser debido a un catálogo incompleto y/o a que esta ley no es totalmente aplicable en ambientes volcánicos.

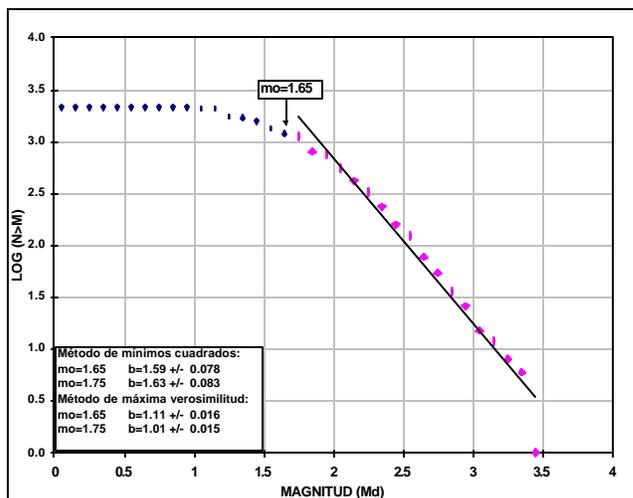


Figura 1. Distribución de Gutenberg-Richter para eventos volcano-tectónicos. Obsérvese que se tomaron dos valores de m_0 , con sus correspondientes valores de b mediante los dos métodos.

El método de máxima verosimilitud es una técnica de mayor solidez que la de mínimos cuadrados y se acerca más al valor real de b cuando el número de sismos grandes es variable (Sha y Bolt, 1982). Por otra parte, el método de mínimos cuadrados ajusta los valores a una recta en función de la densidad de datos que existan en una determinada zona (Press et al, 1987), que a diferencia del método de máxima verosimilitud ajusta la recta al valor medio de los datos sobre la magnitud mínima de homogeneidad, incluida la máxima magnitud observada (Weichert, 1980; Press et al, 1987) lo que a su vez normaliza el aporte que hacen los sismos de diferentes magnitudes. Estas diferencias permiten explicar que el valor de b que mejor reflejaría el estado de esfuerzos en el Volcán Tungurahua es el hallado mediante el método de máxima verosimilitud con una m_0 de 1.65. Se escoge esta m_0 pues la diferencia en los resultados de b con ambos métodos es mucho más pequeña que la obtenida con una m_0 de 1.75.

VARIACION TEMPORAL DE b

Para calcular el valor de b en el tiempo, se tomaron ventanas de 100 eventos sobrelapadas el 50% de manera consecutiva. El promedio de las desviaciones estándar del cálculo de b en las diferentes épocas por el método de mínimos cuadrados es de 0.121, mientras que por máxima verosimilitud es de 0.075, por lo cual se toma este método como el que más se ajusta a los datos. Así que para calcular las ventanas temporales de b se tuvo en cuenta una m_0 de 1.65 y una m_{max} de 3.8. De esta manera se obtuvieron 5 picos y 3 valles importantes en la “curva” temporal de b (figura 2). Los cinco picos máximos importantes ocurrieron de Septiembre a Octubre de 1995 $b=1.295$ ($\sigma=0.081$), de Junio a Diciembre de 1996 $b=1.399$ ($\sigma=0.084$), de Enero a Febrero de 1999 $b=1.370$ ($\sigma=0.083$), de Marzo a Mayo de 1999 $b=1.427$ ($\sigma=0.084$) y de Junio a Julio de 1999 $b=2.120$ ($\sigma=0.104$). Mientras que los 3 valles fueron observados de Enero a Diciembre de 1994 $b=0.571$ ($\sigma=0.04$), de Diciembre de 1995 a Junio de 1996 $b=0.833$ ($\sigma=0.061$) y de Noviembre de 1997 a Agosto de 1998 $b=0.686$ ($\sigma=0.05$).

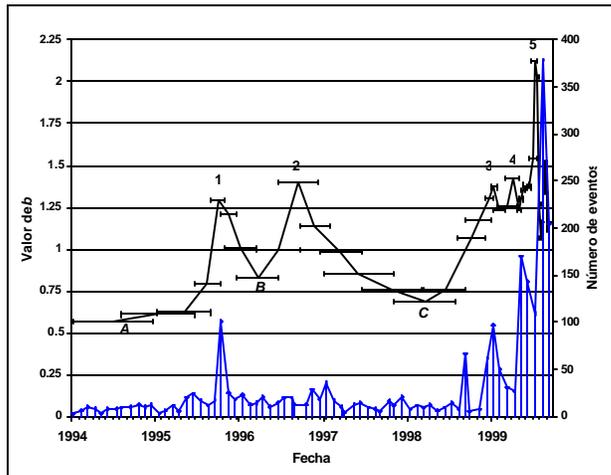


Figura 2. Variación temporal de b : con números de 1 a 5 se señalan los picos máximos más importantes: Septiembre a Octubre de 1995 $b=1.295$ ($\sigma=0.081$), de Junio a Diciembre de 1996 $b=1.399$ ($\sigma=0.084$), de Enero a Febrero de 1999 $b=1.370$ ($\sigma=0.083$), de Marzo a Mayo de 1999 $b=1.427$ ($\sigma=0.084$), y de Junio a Julio de 1999 $b=2.120$ ($\sigma=0.104$). Con letras de A a C se señalan picos mínimos más importantes: de Enero a Diciembre de 1994 $b=0.571$ ($\sigma=0.04$), de Diciembre de 1995 a Junio de 1996 $b=0.833$ ($\sigma=0.061$) y de Noviembre de 1997 a Agosto de 1998 $b=0.686$ ($\sigma=0.05$) (Observado en la estación de Mson).

Dentro de las variables que podrían influir en el cálculo de b se encuentran directamente relacionadas el cálculo de la magnitud para cada evento y el número de eventos de determinada magnitud. Con el fin de observar qué variables influían en dicho cálculo se observó que la diferencia entre los tiempos de arribo de las Ondas S y P (“S-P”) jugaba un papel bien importante, de tal manera que un fuerte aumento en dicho parámetro en Septiembre de 1996 podría haber afectado el resultado incremental de b . Respecto a la duración del evento, este parece ser parte influenciado en el cálculo de b durante Enero, Abril y Junio de 1999, de tal forma que un leve incremento de la duración corresponde directamente con un aumento en el valor de b . En Octubre de 1995 y Julio de 1999 el incremento en el valor de b podría estar relacionado directamente con incremento en el número de sismos.

observó que la diferencia entre los tiempos de arribo de las Ondas S y P (“S-P”) jugaba un papel bien importante, de tal manera que un fuerte aumento en dicho parámetro en Septiembre de 1996 podría haber afectado el resultado incremental de b . Respecto a la duración del evento, este parece ser parte influenciado en el cálculo de b durante Enero, Abril y Junio de 1999, de tal forma que un leve incremento de la duración corresponde directamente con un aumento en el valor de b . En Octubre de 1995 y Julio de 1999 el incremento en el valor de b podría estar relacionado directamente con incremento en el número de sismos.

CORRELACION ENTRE CAMBIOS DE b Y LA ACTIVIDAD TREMÓRICA

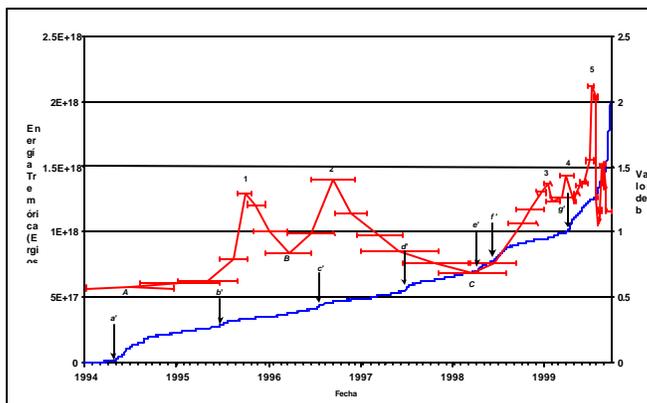


Figura 3. Variación temporal del valor de b y de la energía tremórica acumulada. Las flechas señalan los saltos en la curva de energía acumulada del tremor (observado en la estación de Mson).

Debido a que no es claro definir cuál de los factores causan un anómalo valor de b es necesario buscar otros parámetros que nos ayuden a desarrollar evidencias para conocer las causas de la anomalía. Con este objeto de determinar un suficiente número de posibles correlaciones entre los distintos tipos de actividad sísmica que se registran en el volcán, se planteó la curva de energía tremórica acumulada con la “curva” del valor de b (figura 3). Los picos máximos de b se encuentran inmediatamente precedidos por saltos importantes en la curva de energía del tremor volcánico, lo cual sugiere que existe una correlación entre la actividad

sísmica y tremórica. Únicamente dos saltos en la curva de energía acumulada del tremor en Julio de 1997 (flecha *d'*) y Mayo de 1998 (flecha *e'*) no anteceden de manera inmediata un pico máximo de *b*, probablemente estos saltos son consecuencia del segundo pico de *b* (ocurrido entre Julio y Diciembre de 1996), o tal vez ellos sigan precediendo el tercer pico de *b* (ocurrido entre Enero y Febrero de 1999). Igualmente, hay una excepción con el pico 4, el cual coincide con el mayor salto en la curva de energía tremórica acumulada comprendida entre los meses de Abril y Mayo de 1999 (flecha *g'*).

Por otro lado, las frecuencias dominantes del tremor volcánico consideradas como altas (alrededor de 5 Hz) y bajas (alrededor de 0.5 Hz) se acentúan de manera importante cuando el valor de *b* disminuye entre 1997 y 1998 (valle *C*) precediendo con un gran período de anticipación los picos de *b* (3, 4 y 5) en 1999 (figura 4). Estos hechos, podrían estar indicando en la época del valle de *b* una acumulación importante de esfuerzos que justamente estaría precediendo la fracturación de un medio en el que el calor y la densidad de grietas serían la principal causa de los altos valores de *b* observados en 1999. Probablemente debido a dichos hechos, desde Mayo de 1999 un mayor flujo de calor o esfuerzo termal fue evidenciado mediante una alta actividad fumarólica, un incremento en el olor y concentración de azufre en Julio de 1999 y el comienzo de la actividad eruptiva del volcán desde Septiembre de 1999 con importantes caídas de ceniza en los alrededores del volcán.

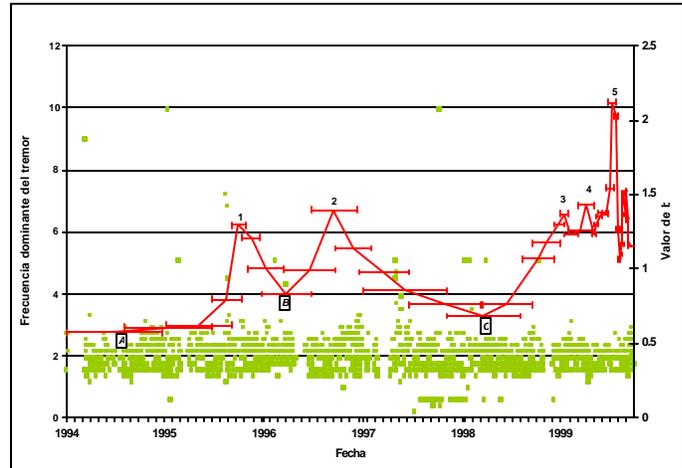


Figura 4. Variación temporal del valor de *b* y la frecuencia dominante diaria del tremor (Observado en la estación de Mson).

CORRELACIÓN CON CAMBIOS GEOQUÍMICOS

En el Tungurahua hay 4 fuentes termales que son monitoreadas desde 1994. Dichas fuentes se encuentran localizadas en los flancos NE y SW del volcán, entre 3.3 y 9.3 km de distancia desde la cumbre. En dichas fuentes se han medido distintos parámetros geoquímicos y físicos que pueden ser interpretados como informadores potencialmente útiles de la actividad magmática si es que las condiciones lo permiten, es decir, que mientras hay ascenso de magma, los cambios en las condiciones subterráneas podrían ser reflejados en las composiciones de los gases y compuestos químicos disueltos y emitidos por las fuentes termales, y fumarólicas del volcán.

Mediante el método analítico, espectroscopía de absorción atómica, cromatografía de gases, potenciometría entre otros, se estudian las especies químicas de Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sílice (SiO₂), Bicarbonatos (HCO₃), Cloro (Cl) y Sulfatos (SO₄). Adicionalmente se toman datos del pH, temperatura y conductividad de las fuentes termales del Volcán Tungurahua. De todo estos parámetros geoquímicos se notaron pocos pero importantes cambios respecto a la media de datos, que podrían estar relacionados con aportes magmáticos en las distintas épocas que se realizó el muestreo. En la tabla 1 se muestran los cambios geoquímicos observados de los muestreos colectados entre 1994 y 1999, que sobrepasan o igualan el resultado de sumar la media y el 25% de dicha media de muestreo por cada especie química en por lo menos dos estaciones simultáneamente. También se muestran los cambios que sobrepasan o igualan el resultado de sumar la media y el 2% de dicha media en el caso de la temperatura o el 10% en el caso de la conductividad o el pH.

Tabla 1. Fechas y fuentes termales que registraron los cambios más importantes de los diferentes patrones geoquímicos. En negrilla se señalan las fechas comunes en que se presentaron los cambios para las distintas especies químicas e igualmente en negrilla se resaltan todas las fuentes termales que registraron simultáneamente los cambios geoquímicos.

Especie Química	Fecha en la que se registró el cambio	Fuentes termales que registraron un cambio positivo (incremento)
Sodio	30-Dic-97	1,3,4
	22-Dic-98	1,2,3,4
Potasio	10-Ago-98	1,2,3,4
Calcio	24-Feb-94	1,2,3
	06-Jun-95	1,2,3
	23-Sep-97	1,3,4
Magnesio	30-Dic-97	3,4
	27-May-98	1,2,4
Sílice	19-Oct-95	1,2,3
	24-Sep-99	3,4
Bicarbonatos	-	-
Sulfatos	10-Nov-94	
Otros parámetros (físicos)		
Temperatura	17-Abr-96	1,2,3
	01-Jul-97 y 22-Abr-97	1,2
	23-Sep-97 y 30-Dic-97	1,2,4
	17-Mar-98 y 28-May-98	1,2,3,4
	10-Ago-98	1,2,4
	18-Ago-99	1,2
Conductividad	01-Jul-97, 22-Abr-97	1,3
	30-Dic-97, 31-Ago-99	1,3
	15-Sep-99, 27-Oct-99	1,3
PH(*)	26-May-94, 27-Mar-95	1,2,3
	06-Jun-96, 17-Abr-96	1,2,3
	01-Jul-97, 22-Abr-97	1,2,3
	22-Dic-98, 18-Ago-99	1,2,3,4
	15-Sep-99	1,2,3,4

(1) El Salado, (2) Palitagua, (3) La Virgen, (4) Santana

(*) Como se mostraban muchos cambios en dos estaciones, únicamente se muestran en más de dos estaciones.

Las concentraciones de Sílice, Sodio, Potasio, Magnesio y Bicarbonatos presentes en las fuentes termales crecieron y decrecieron simultáneamente con los cambios temporales del valor de b (figura 5). Solo en dos casos excepcionales como el pH y la conductividad parecen haber seguido incrementándose pese a los descensos del valor de b .

La correspondencia entre el incremento de las concentraciones geoquímicas y el valor b estaría de acuerdo con la hipótesis de que cuando se determinan valores de b más altos implícitamente estaría reflejando un medio más fracturado y más caliente lo que facilitarían que los fluidos magmáticos puedan viajar más fácilmente a través del volcán y ser portadores de manera significativa de los incrementos en las concentraciones de los aniones y cationes medidos en las fuentes termales. En contraste la baja correspondencia entre las variaciones del pH y la conductividad con el valor de b podría ser el resultado de la baja confiabilidad de las mediciones o ser indicativo que el efecto de la excitación magmática subsista después de un corto período de calma y/o intensa actividad. Sin embargo, los incrementos del pH en sus fases “iniciales” serían valiosos de

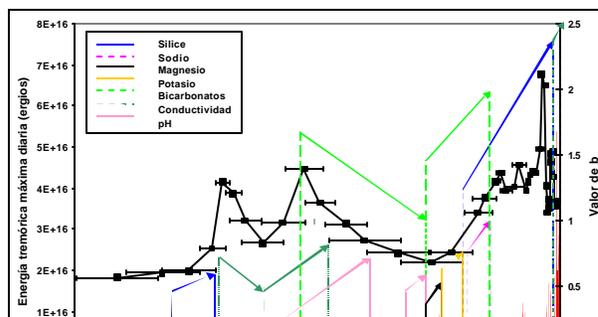


Figura 5. Correspondencia entre los cambios del valor de b y los cambios geoquímicos registrados. Las flechas hacia arriba indican incrementos, y las flechas hacia abajo indican una disminución del patrón geoquímico (estos cambios no están de acuerdo a una escala de concentraciones).

tener en cuenta ya que tales incrementos podrían deberse a que cuando ocurre un incremento en la temperatura cerca de los cuerpos magmáticos, el nivel de las aguas de las fuentes termales podría disminuir su nivel, así que el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno y otros gases son perdidos durante el “boiling” y el pH en este caso debería incrementarse debido a la pérdida de los gases ácidos.

DISCUSION

En definitiva, desde Marzo a Abril de 1995 el valor de b viene aumentando llegando a un pico máximo entre Septiembre y Octubre de 1995, ello coincide a su vez con un aumento en la frecuencia y energía del tremor, además del incremento en el número de sismos volcano-tectónicos. Sin embargo, vale la pena mencionar que la energía tremórica tiene su máximo en Abril de 1995. El descenso de b se hace paulatino desde Octubre de 1995 hasta fines de Marzo de 1996 y ello coincide con un descenso en la energía tremórica. Luego, desde fines de Marzo de 1996 el b vuelve a aumentar llegando a un pico máximo de Junio a Diciembre de 1996, antes de este pico máximo fue posible observar dos picos máximos en la energía tremórica uno en Mayo y otro en Julio de 1996. Desde Septiembre de 1996 el valor de b disminuye paulatinamente hasta Agosto de 1998, sin embargo se registran dos picos importantes en la energía tremórica en Febrero y Julio de 1997, y en Enero de 1998 que podrían o no coincidir con la disminución de b o incluso ser “causa” del siguiente ascenso en b desde Marzo de 1998 hasta registrarse un pico máximo entre Enero y Febrero de 1999. Seguido a lo anterior ocurre un pico máximo de energía tremórica a inicios de Marzo de 1999, el cual coincide con un pico máximo de b registrado entre Marzo y Mayo de 1999. Después de éste último pico de b inmediatamente ocurren varios picos de energía tremórica antes de llegar al máximo pico de b determinado en este período de estudio. Después de este pico, aunque el valor de b disminuye un poco, la energía tremórica llega a su máximo valor registrado desde Enero de 1994.

Es importante notar dos aspectos que se relacionan. A pesar de que el valor de b disminuye drásticamente hasta Agosto de 1998 y después de Julio de 1999 la energía tremórica continua aumentando sin obedecer el patrón que hasta el momento se registraba, ello puede ser indicio de un efecto de reacción debido a los picos máximos de b registrados de Junio a Diciembre de 1996 y de Junio a Julio de 1999. Así que en estas épocas aún no hay claridad entre estos dos fenómenos y cualquiera de ellos podría ser la causa o el efecto del otro.

CONCLUSIONES

Los valores de b (entre 1 y 2.5) obtenidos en el presente estudio son tan altos como los hallados experimentalmente por Warren y Latham (1970). Como es de esperarse, estos valores de b son consistentes para actividad sísmica relacionada con volcanismo donde amplios gradientes termales podrían ser esperados. Ello, permite inferir que los esfuerzos internos en el Volcán Tungurahua podrían corresponder principalmente a efectos termales. Dichos valores fueron importantes entre Septiembre y Octubre de 1995, Junio a Diciembre de 1996, Enero a Febrero de 1999, Marzo a Mayo de 1999 y Junio a Julio de 1999. Igualmente, un esfuerzo no uniforme y un medio más fracturado en dichos períodos podrían haber propiciado valores de b tan altos, mientras que, los valores de b más bajos (entre 0.5 y 1) ocurridos entre Enero y Diciembre de 1994, Diciembre de 1995 y Junio de 1996, Noviembre de 1997 y Agosto de 1998, podrían estar relacionados con un aumento del esfuerzo aplicado que justamente antecedió la formación de una(s) fractura(s) macroscópica(s) que tuvieron lugar en los períodos en que se produjeron los valores de b más altos durante 1999.

Debido a que cambios en el estado de esfuerzos del volcán podrían facilitar variaciones en el comportamiento de los fluidos internos, se intentó hacer correlaciones entre el valor de b y las actividades tremórica y geoquímica:

Se identificó que las variaciones en la concentración de bicarbonatos, sodio, magnesio y sílice medidas en las fuentes termales coincidieron con cambios en el valor de b . Dicha correspondencia probablemente estaría indicando que al existir una mayor circulación de fluidos magmáticos al interior del edificio volcánico, podría ocurrir un incremento en la concentración de los aniones y cationes mencionados anteriormente. Asumimos que dicha circulación de fluidos sería importante cuando aumente la densidad de grietas en el medio y los esfuerzos dominantes sean principalmente de tipo termal. Es decir, ello sería reflejado cuando se determinen valores de b muy altos (probablemente mayores que 1.5).

En cuanto a la actividad tectónica, se observó que las frecuencias alrededor de 0.5 y 5 Hz aparecen varios meses entre 1997 y 1998 justo antes del primer pico de b en 1999. Ello, más los altos valores de b registrados en 1999 podrían estar reflejando el inicio de una actividad térmica anormal lo cual fue evidenciado en una alta actividad fumarólica en Mayo de 1999, el incremento del SO_2 en Julio de 1999 y el inicio de la subsiguiente actividad eruptiva a través de explosiones freato-magmáticas en Octubre de 1999 y magmáticas desde Noviembre de 1999.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1965) *Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits*. Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ. 43, p. 237-239.
- Bender, B. (1983) *Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol 73, p. 831-851.
- Fronlich, C., y Davis, S. (1994) *Teleseismic b values: Or much ado about 1.0*. J. Geophys. Res. 98, p. 631-634.
- Gutenberg, B., y Richter, C.F. (1944) *Frequency of earthquakes in California*. Bull. Seism. Soc Am. 34, p. 185-188.
- Gutenberg, B., y Richter, C.F. (1949) *Seismicity of the earth*. Princeton Univ Press.
- Ishimoto, M., e Iida, K. (1939) *Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently*. Bull. Earthq. Res. Int. 17, p. 443-478.
- Lee, W.K.H., Bennett, R.E., y Meagher, K.L. (1972) *A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration*. Geol. Surv. Open-file Rep. 28.
- Mogi, K. (1962) *Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena*. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 40, 125 p.
- Power, J.A., Wyss, M., y Latchman, J. (1998) *Spatial variation in the frequency-magnitude distribution of earthquakes at Soufriere Hills Volcano, Monserrat, West Indies*. J. Res. L. Vol 25, No 19, p. 3653-3656.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., y Vetterling, W. T. (1986.) *Numerical Recipes*, 818 pp.
- Sha, Y., y Bolt, B.A. (1980) *The standard error of the magnitude-frequency b value*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 72, p. 1677-1687.
- Scholz, C.H. (1968) *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 58, No1, p. 399-415.
- Seismology of volcanoes in Japan*. En: Physical volcanology developments in solid earthquake geophysics, Editado por Civetta et al. Vol 6, p. 1-27.
- Urbancic, T. I., Trifu, C. I., Long, J. M., and Toung, R.P. (1992) *Space-time correlations of b -values with stress releases*, PAGEOPH, 139, p. 449-462.
- Utzu, T. (1974) *A three-parameter formula for magnitude distribution of earthquakes*. J. Phys. Earth. 22, p. 71-85.
- Vinogradov, S.D. (1959) *On the distribution of the number of fractures in dependence on the energy liberated by the destruction of rocks*. Bull. (Izv) Acad., Sci. USSR Geophys. Ser. 12, p. 1850-1852.
- Vinogradov, S.D. (1962) *Experimental study of the distribution of the number of fractures in respect to the energy liberated in the destruction of rocks*. Bull. (Izv) Acad., Sci. USSR Geophys. Ser. p. 171-180.
- Warren, N., y Latham, G. (1970) *An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity*. J. Geophys. Res. Vol. 75, No 23, p. 4455-4464.
- Weichert, D. (1980) *Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observations for different magnitudes*. Bull. Seism. Soc. Am. 70, p. 1337-1346.
- Wiemer, S., McNutt, S., y Wyss, M., (1998) *Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency-magnitude distribution near Long-Valley Caldera, California*. Geophys. J. Int. 134, p. 409-421.
- Wyss, M. (1973) *Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution*. J. R. Astr. Soc. 31, p. 341-359.
- Wyss, M., Shimasaki, K., y Wiemer, S. (1997) *Mapping active magma chambers by b -values beneath off Ito Volcano, Japan*. J. Geophys. Res., in press.