

Cambios temporales del valor de b : ¿Posibles correlaciones con la actividad hidrotermal del volcán Tungurahua?

C. INDIRA MOLINA P., MARIO C. RUIZ

Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional - Quito-Ecuador. Mail: cimp@tera.com.co

RESUMEN

El volcán Tungurahua, localizado en la Cordillera Real del Ecuador, se encuentra desde septiembre de 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, y se encontraron cinco picos máximos: 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: $b = 2.120$ ($\sigma = 0.104$). Parece que los picos de b se encuentran antecedidos por saltos en la curva de energía tremórica, lo cual sugiere una posible correlación.

Durante el período estudiado, la evolución espectral del tremor volcánico muestra que existen 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 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.

PALABRAS CLAVE: VOLCANES, VALOR DE b , TREMOR, FRECUENCIA, ENERGÍA, Y SISTEMA HIDROTHERMAL

ABSTRACT

Tungurahua Volcano, located in the Cordillera Real of Ecuador, has been in mild eruptive activity from September 1999 to the present. Using the maximum verosimilitude 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.

KEY WORDS: VOLCANOES, b -VALUE, TREMOR, FREQUENCY, ENERGY AND HYDROTHERMAL SYSTEM

INTRODUCCIÓN

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 una región durante cierto período; a es una cons-

tante que depende del período 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 igual a la 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 pro-

porcional 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 generalmente están cercanos a 1 en muchos lugares de la corteza terrestre (Fronlich y Davis, 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 volcánico-tectónicos tipo A, el valor de b es alrededor de 1.5.

Mediante el estudio experimental en muestras de roca sometidas a cargas mecánicas, se halló que los valores de b son normalmente cercanos a 1 (Mogi, 1962, Scholz, 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 y Latham, 1970).

Para enjambres sísmicos, el valor de b suele ser bien distinto de 1 y pueden alcanzar valores altos, cerca de 2.5 (Mogi, 1962). Scholz (1968) encuentra que, para enjambres sísmicos, el valor de b suele ser bien distinto de 1 y puede 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 muy fracturadas alrededor de las cámaras magmáticas, mientras que los valores de b "normales" (es decir menores que 1) se encontraron en áreas circundantes (Wyss, *et al.*, 1997). En la caldera de Long Valley, los valores de b variaron entre 0.6 y 2. Los valores más altos se registraron cerca del domo resurgente (Wiemer, *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, la temperatura y las condiciones de esfuerzo en el medio, mientras que los valores más bajos de b están dados probablemente 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 se refleja en 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 encuentra el 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. Además, un esfuerzo no uniforme también da lugar a valores más altos de b (Mogi, 1962). 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 es-

fuerzo 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 observación; en consecuencia se presentan desviaciones importantes en la zona lineal de la regresión Gutenberg-Richter (Weichert, 1980; Bender, 1983). Para minimizar el valor de b se calcula mediante datos 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 volcánico-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:

$$M_D = \alpha + \beta \log \tau + \delta \Delta \quad (2)$$

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 la intersección 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, 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 b para todo el catálogo, se tomaron dos valores supuestos de magnitud de mínima homogeneidad (m_o); los resultados muestran una diferencia muy pequeña para el mismo método (figura 1). Sin embargo, los valores de b calculados muestran, de un método a otro, una diferencia del 48% para $m_o = 1.65$ y del 62% para $m_o = 1.75$. 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 deberse a un catálogo incompleto o a que esta ley no es totalmente aplicable en ambientes volcánicos.

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). El método de mínimos cuadrados ajusta los valores a una recta en

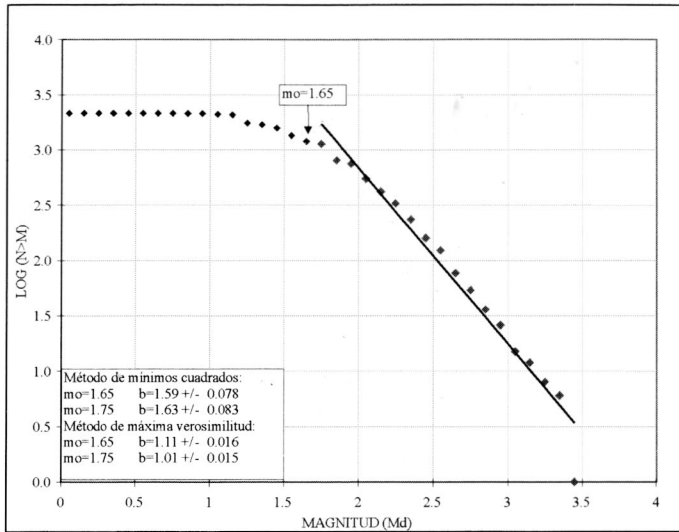


Figura 1. Distribución de Gutenberg-Richter para eventos volcano-tectónicos. Obsérvese que se tomaron dos valores de m_0 , con sus correspondientes valores de b obtenidos mediante los dos métodos.

función de la densidad de datos que existan en determinada zona (Press *et al.*, 1987), mientras que el 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 reflejaría mejor 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 porque la diferencia en los resultados de b , en ambos métodos, es mucho más pequeña que la obtenida con una m_0 de 1.75.

VARIACIÓN TEMPORAL DE b

Para calcular el valor de b en el tiempo, se tomaron ventanas de 100 eventos superpuestas 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 0.121, mientras que por máxima verosimilitud es 0.075, por lo cual se toma este método como el que más se ajusta a los datos. Así, para calcular las ventanas temporales de b se tuvo en cuenta una m_0 de 1.65 y una $m_{máx}$ 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: $b = 2.120$ ($\sigma = 0.104$). 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: $b = 0.686$ ($\sigma = 0.05$).

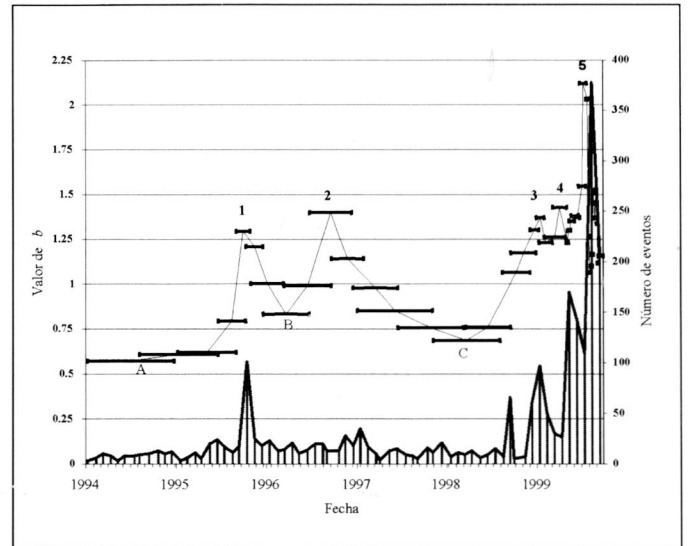


Figura 2. Variación temporal de b . Con números de 1 a 5 se señalan los picos máximos más importantes: septiembre a octubre de 1995: $b = 1.295$ ($\sigma = 0.081$); de junio a diciembre de 1996: $b = 1.399$ ($\sigma = 0.084$); de enero a febrero de 1999: $b = 1.370$ ($\sigma = 0.083$); de marzo a mayo 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).

Entre 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. Al indagar 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 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, ésta parece ser parte influenciada en el cálculo de b durante enero, abril y junio de 1999, de modo 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 el incremento en el número de sismos.

CORRELACIÓN ENTRE CAMBIOS DE b Y LA ACTIVIDAD TREMÓRICA

Debido a que no es claro definir cuál de los factores causan un valor anómalo de b , es necesario buscar otros parámetros que ayuden a desarrollar evidencias para conocer las causas de la anomalía. Con el objeto de determinar suficiente número de posibles correlaciones entre los distintos tipos de actividad sísmica que se registran en el volcán, se plotó 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 temblor volcánico, lo cual sugiere que existe

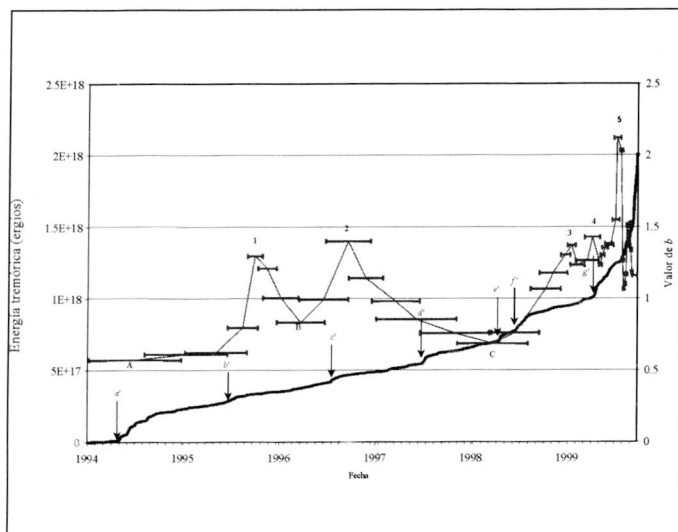


Figura 3. Variación temporal del valor de b y de la energía tremórica acumulada. Las flechas señalan los saltos en la curva de energía acumulada del temer (observado en la estación de Mson).

correlación entre la actividad sísmica y la tremórica. Únicamente dos saltos en la curva de energía acumulada del temer 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, 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 temer volcánico consideradas como altas (alrededor de 5 Hz) o 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 gran anticipación los picos de b (3, 4 y 5) en 1999 (figura 4). Estos hechos podrían indicar, 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, notó un mayor flujo de calor o esfuerzo termal evidenciado por alta actividad fumarólica, 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.

CORRELACIÓN CON CAMBIOS GEOQUÍMICOS

En el Tungurahua hay cuatro fuentes termales monitoreadas desde 1994. Dichas fuentes se encuentran localizadas en los flancos NE y SO del volcán, entre 3.3 y 9.3 km de la cumbre. En dichas fuentes se

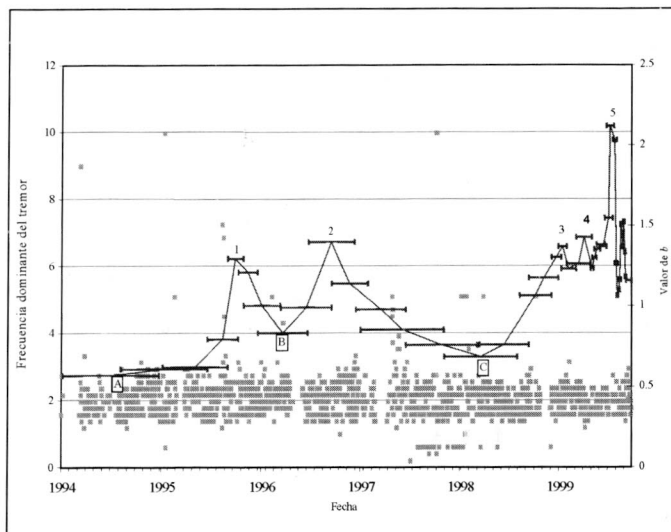


Figura 4. Variación temporal del valor de b y la frecuencia dominante diaria del temer (observado en la estación de Mson).

han medido distintos parámetros geoquímicos y físicos que pueden ser interpretados como informadores potencialmente útiles de la actividad magmática, si las condiciones lo permiten. Es decir, que mientras haya 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 y potenciometría, entre otros, se estudian las especies químicas de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sílice (SiO_2), bicarbonatos (HCO_3), cloro (Cl) y sulfatos (SO_4). Adicionalmente se toman datos del pH, temperatura y conductividad de las fuentes termales del volcán Tungurahua. En todos 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 del 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.

Las concentraciones de sílice, sodio, potasio, magnesio y bicarbonatos en las fuentes termales crecieron y decrecieron simultáneamente con los cambios temporales del valor de b (figura 5). Solo en dos casos excepcionales, 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

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 Y TODAS LAS FUENTES TERMALES QUE REGISTRARON LOS CAMBIOS GEOQUÍMICOS SIMULTÁNEAMENTE.

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
Silice	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
	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 registraron muchos cambios en dos estaciones, únicamente se muestran en más de dos estaciones.

cuando se determinan valores de b más altos, implícitamente estaría reflejando un medio más fracturado y más caliente, lo cual facilitaría 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 va-

riaciones 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 subsiste después de un corto período de calma o intensa actividad. Sin embargo, sería importante tener en cuenta los incrementos del pH en sus fases “iniciales” ya que tales incrementos podrían deberse a que cuando aumenta la temperatura cerca de los cuerpos magmáticos, el nivel de las aguas de las fuentes termales podría disminuir, de modo que el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno y otros gases se pierden durante el *boiling*. En este caso, el pH debería incrementarse debido a la pérdida de los gases ácidos.

DISCUSIÓN

En definitiva, desde marzo a abril de 1995 el valor de b viene aumentando hasta llegar a un pico máximo entre septiembre y octubre de 1995, lo cual 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 alcanza su máximo en abril de 1995. El descenso de b se hace paulatino desde octubre de 1995 hasta fines de marzo de 1996, coincidiendo con un descenso en la energía tremórica. Luego, desde fines de marzo de 1996, el valor de b vuelve a aumentar hasta 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 re-

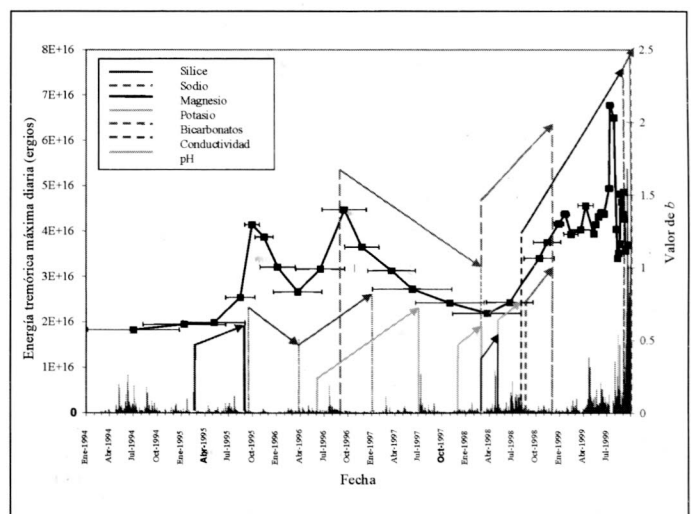


Figura 5. Correspondencia entre los cambios del valor de b y los cambios geoquímicos registrados. Las flechas ascendentes indican incrementos; las flechas descendentes indican disminución del patrón geoquímico (estos cambios no concuerdan con una escala de concentraciones).

gistrar un pico máximo entre enero y febrero de 1999. Después de 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. Inmediatamente después de este último pico de b 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 continúa 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. En estas épocas aún no hay claridad acerca de 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 la actividad sísmica relacionada con volcanismo, en que podrían esperarse amplios gradientes termales. Esto 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 más altos de b 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 observó 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 señale que, al existir mayor circulación de fluidos magmáticos en el interior del edificio volcánico, podría ocurrir un incremento en la concentración de los aniones y cationes mencionados anteriormente. Se asume que dicha circulación de fluidos sería importante cuando aumente la densidad de grietas en el medio y los esfuerzos dominantes sean de tipo termal principalmente. Es decir, se

vería reflejado cuando se determinen valores de b muy altos (probablemente mayores que 1.5).

En cuanto a la actividad tremórica, 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. Esto, más los altos valores de b registrados en 1999, podría reflejar el inicio de una actividad térmica anormal lo cual fue evidenciado por una alta actividad fumarólica en mayo de 1999, el incremento del SO_2 en julio de 1999 y el inicio de la actividad eruptiva subsiguiente a través de explosiones freato-magmáticas en octubre de 1999, y magmáticas desde noviembre de 1999.

BIBLIOGRAFÍA

- AKI, K. 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earth. Res. Inst.* 43: 237-239. Tokyo University.
- BENDER, B. 1983. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73: 831-851.
- FRONLICH, C., and DAVIS, S. 1994. Teleseismic b values: Or much ado about 1.0. *J. Geophys. Res.* 98: 631-634.
- GUTENBERG, B., and RICHTER, C.F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34: 185-188.
- GUTENBERG, B., and RICHTER, C.F. 1949. *Seismicity of the earth*. Princeton University Press.
- ISHIMOTO, M., e IIDA, K. 1939. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently. *Bull. Earthq. Res. Int.* 17: 443-478.
- LEE, W.K.H.; BENNETT, R.E., and 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.* 40: 125. Tokyo University.
- POWER, J.A., WYSS, M., and LATCHMAN, J. 1998. Spatial variation in the frequency-magnitude distribution of earthquakes at Soufriere Hills Volcano, Monserrat, West Indies. *J. Res. L.* 25(19): 3653-3656.
- PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A., and VETTERLING, W. T. 1986. *Numerical Recipes*.
- SHA, Y., and BOLT, B.A. 1980. The standard error of the magnitude-frequency b value. *Bull. Seism. Soc. Am.* 72: 1677-1687.
- SCHOLZ, C.H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58(1): 399-415.
- 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): pp. 449-462.
- UTZU, T. 1974. A three-parameter formula for magnitude distribution of earthquakes. *J. Phys. Earth.* 22: 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, pp. 1850-1852.
- _____. 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.* pp. 171-180.
- WARREN, N., and LATHAM, G. 1970. An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity. *J. Geophys. Res.* 75(23): 4455-4464.
- WEICHERT, D. 1980. Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observations for different magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70: 1337-1346.
- WIEMER, S.; McNUTT, S., and WYSS, M. 1998. Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency-magnitude distribution near Long-Valley Caldera, California. *Geophys. J. Int.* 134: 409-421.
- WYSS, M. 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *J. R. Astr. Soc.* 31: 341-359.
- WYSS, M., SHIMASAKI, K., and WIEMER, S. 1997. Mapping active magma chambers by b -values beneath off Ito Volcano, Japan. *J. Geophys. Res.*, in press.