

Mapeo tridimensional del valor b en el Volcán Nevado del Ruíz, Colombia*¹

[3D mapping of b -value at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia]

JOHN MAKARIO LONDOÑO B.², SANDRA PATRICIA RODRÍGUEZ G.³

RECIBO: 20.02.2013 – APROBACIÓN: 03.12.2013

Resumen

Se realizó un mapeo tridimensional del valor- b para la sismicidad volcano-tectónica del Volcán Nevado del Ruiz (VNR) para el período comprendido entre 1985 y 2002. Se pudieron definir cuatro zonas anómalas (altos valores) de b en el VNR, localizadas, una al oeste del cráter activo cerca al cráter la Olleta ($b=1.3-1.8$), asociada con un sistema hidrotermal en superficie ($z=1\text{Km}$) y una zona de alimentación magmática en profundidad ($z=6\text{Km}$); otra zona ($b=1.4$), ubicada bajo el cráter activo Arenas ($z=1\text{Km}$) asociada con un sector de acumulación de vapor y fluidos que harían parte del sistema hidrotermal del VNR; otra zona ($b=1.7$), localizada al sur del cráter activo ($z=6\text{Km}$) asociada posiblemente a la localización de una de las cámaras magmáticas del VNR; y otra zona ($b=1.7$), ubicada al NE del cráter activo ($z=3\text{Km}$) cerca al cráter la Piraña, asociada también a una zona de alimentación magmática. Estas zonas son coincidentes con las halladas en otros estudios usando tomografía sísmica para el VNR, al igual que con estudios petrológicos y geoquímicos.

* Modelo para la citación de este artículo:

LONDOÑO B., John Makario & RODRÍGUEZ G., Sandra Patricia (2013). Mapeo tridimensional del valor b en el Volcán Nevado del Ruíz, Colombia. En: Ventana Informática No. 29 (jul-dic). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 129-144. ISSN: 0123-9678

- 1 Artículo de investigación científica y tecnológica proveniente del proyecto Distribución espacial de la relación frecuencia-magnitud de sismos en el volcán Nevado del Ruiz, ejecutado durante el periodo 05.2008-05.2009, en el Servicio Geológico Colombiano
- 2 Geólogo, MSc. en Geofísica, PhD en Geociencias. Profesional Especializado, Servicio Geológico Colombiano (Manizales, Caldas, Colombia), Correo electrónico: jmakario@sgc.gov.co
- 3 Geóloga. Profesional Independiente (Manizales, Caldas, Colombia). Correo electrónico: sprdriguez@gmail.com

Palabras clave: valor-*b*, mapeo 3D, sismicidad, distribución frecuencia-magnitud de sismos

Abstract

*Three-dimensional mapping of *b*-value (frequency-magnitude distribution) was done for Nevado del Ruiz Volcano (NRV), Colombia for the period 1985-2002. Four high *b*-value zones were detected. The first zone ($b=1.3-1.8$), located to the west of the active crater (Arenas), close to the Olleta crater. This zone was associated with a hydrothermal system at surface ($z=1\text{Km}$), and with a zone of magma supply at depth ($z>6\text{Km}$). The second zone ($b=1.4$), located beneath the Arenas crater ($z=1\text{Km}$) was associated with a zone of fluid and vapor accumulation related with the hydrothermal system of NRV. The third zone ($b=1.7$), located to the south of Arenas crater ($z=6\text{Km}$) was associated with one of the magmatic chambers of NRV; and the forth zone ($b=1.7$), located to the NE of the Areas crater ($z=3\text{Km}$) near to the Piraña crater, was associated with another magma supply zone. Those zones are in agreement with studies of seismic tomography, geochemistry and petrology done previously at NRV.*

Keywords: *b*-value, 3d mapping, seismicity, earthquake frequency-magnitude distribution

Introducción

Dentro de los estudios que se pueden aplicar para el análisis de la evolución espacial y temporal de la sismicidad, está el método de Gutenberg y Richter (Gutenberg & Richter, 1944), que relaciona la magnitud de los sismos ocurridos en una región y la frecuencia u ocurrencia de los mismos en el tiempo. El valor y comportamiento de la pendiente de esta relación lineal, da como resultado un factor que permite estimar algunas características relacionadas con la tectónica de la región y con el desarrollo de la sismicidad de la misma. A este factor se le denomina Valor *b* ó Distribución Frecuencia-Magnitud.

El cálculo del valor *b* es una técnica desarrollada a mediados del siglo XX. Gutenberg & Richter (1944), aplicaron por primera vez ésta técnica para el estudio de zonas sísmicamente activas, para el pronóstico de sismos. Con el tiempo la técnica se ha ido mejorando y se ha utilizado principalmente al estudio de zonas tectónicamente activas y recientemente al estudio en zonas volcánicas. El estudio de las variaciones espaciales desde este parámetro, o la variación temporal del mismo en

una determinada área, permite conocer características propias de la naturaleza tectónica y física del área, asociadas a la sismicidad.

Utsu (1965), enuncia que para un sismo de magnitud considerable, la frecuencia u ocurrencia de sismos con magnitudes pequeñas será mínima y viceversa; además enuncia que existen diferencias en cuanto a la distribución frecuencia-magnitud para sismos premonitorios y réplicas para sismos fuertes. Knopoff, Kagan & Knopoff (1982), realizaron pruebas experimentales a partir de análisis estadísticos de datos sísmicos, encontrando algunas diferencias importantes de valores de b para sismos premonitorios y réplicas, y proponen que resultados similares se pueden esperar en sismos reales.

Wesnousky (1994), utilizó la distribución frecuencia-magnitud para estudiar la mecánica del comportamiento de las fallas en la región al sur-este de California (USA), además de conocer el tiempo de retorno de grandes sismos y analizar el riesgo sísmico en la región. Wiemer & Benoit (1996), también aplicaron esta técnica en zonas volcánicas e identificaron una zona anómala de altos valores de b a profundidades de 90-100 km., sobre la superficie de la zona Wadatti-Benioff directamente debajo de los arcos volcánicos en Alaska; Wiemer et al. (1996), hallaron altos valores de b cerca de la cámara magmática en el Monte Santa Helena (Washington, USA) y en el Monte Spurr (Alaska). Wyss et al. (1997), hallaron iguales resultados en el área volcánica Off-Ito en Japón.

Wiemer et. al. (1997), señalan que si se conoce la distribución frecuencia-magnitud en zonas de asperezas se puede estimar el tiempo de recurrencia para sismos moderados en la zona de Parkfield-Morgan Hill de la falla de San Andrés, California.

Respecto a estudios realizados en el área del VNR, acerca del valor b , Casas (1991) realizó un estudio temporal preliminar. Él asoció los cambios temporales de b con presurizaciones y despresurizaciones del sistema volcánico. La metodología aplicada por Casas (1991) carece de análisis de error del valor b . Recientemente, Wiemer et. al. (1997), desarrollaron una nueva técnica que permite el mapeo tridimensional del Valor b . Con esta técnica se han podido delinear zonas asociadas con cámaras o cuerpos magmáticos en varias zonas volcánicas del mundo. Esta técnica promete ser muy efectiva en la ayuda para la delimitación de áreas magmáticas combinada con otras técnicas como la tomografía sísmica. En este estudio se pretende aplicar esta técnica de mapeo tridimensional del valor b en el área del Volcán Nevado del Ruiz (VNR).

1. Fundamento teórico

Partiendo del estudio del comportamiento que presentaban los eventos sísmicos y sus magnitudes durante la ocurrencia de un enjambre sísmico o una secuencia de réplicas, Gutenberg y Richter desarrollaron en 1944 una relación que permite estimar algunas características de la zona de estudio, estableciendo una correspondencia lineal entre la magnitud de los sismos y la frecuencia con la que estos se presentan en una zona determinada. La relación se presenta en la siguiente ecuación de Gutenberg & Richter, citado por Wyss (1973):

$$\text{Log}_{10} N = a - bM \quad (1)$$

donde:

N = Número acumulado de sismos con magnitudes iguales o mayores a la magnitud M (Magnitud dada en un período de tiempo determinado).

a = Intercepto de la recta con el eje de las ordenadas.

b = Pendiente de la recta o valor b. Es inversamente proporcional a la magnitud promedio.

M = Magnitud calculada para cada uno de los sismos.

Las constantes a y b describen el poder de decaimiento de la frecuencia u ocurrencia de los sismos con el incremento de la magnitud.

La relación entre magnitud de los sismos y la frecuencia con la que se presentan, es lo que se ha denominado valor b (ó pendiente de la recta), que tiene una interpretación física dependiendo entre otras causas, de: zona de estudio, heterogeneidad del material, gradiente termal, profundidad, niveles de esfuerzos, entre otras.

La ecuación para calcular el valor b es:

$$b = \frac{\text{Log } e}{[M] - M_c} \quad (2)$$

b = valor b.

[M] = Magnitud media para los eventos considerados.

M_c = Magnitud de Complejidad (Magnitud mínima considerada).

El error de b es igual a $1.96 * b / \sqrt{n}$ en unos límites de confianza del 95% para una distribución normal (Wyss, 1973).

Para el presente trabajo se calculó el valor b utilizando los siguientes métodos:

El método de *Mínimos Cuadrados Pesados*, que se ajusta a la pendiente de la distribución frecuencia-magnitud. El ajuste será extendido desde el punto de máxima curvatura de la distribución frecuencia-magnitud (hallado por la derivada) hasta la magnitud máxima del grupo de datos del catálogo, representado con la ecuación (1).

El Método de *Máxima Probabilidad* estima el valor b basado en la magnitud media (Aki, 1965; Utsu, 1965), con la expresión:

$$b = \frac{0.4343}{[M] - M_c} \quad (3)$$

Donde $[M]$ es el valor medio de todas las magnitudes dentro de los rangos seleccionados del catálogo. La estimación del método de Máxima Probabilidad se calcula usando todos los eventos del catálogo, el cual se crea seleccionando todos los eventos iguales o mayores que la magnitud de completitud $[M_c]$.

Uno de los principales problemas a tener en cuenta al calcular el valor de b , es la determinación de su error. Hasta hace un par de décadas atrás, no se le daba mucha importancia al efecto del error, pero algunos estudios han demostrado que la evaluación del error en el cálculo de b , es un factor crítico para obtener unos resultados confiables, según Shi & Bolt (1982) y Bender (1983).

Como se indicó anteriormente, el valor b puede ser calculado por el método de Mínimos Cuadrados Pesados, pero la presencia de algunos datos con magnitudes más grandes pueden alterar los resultados de b de manera significativa. La varianza de la ecuación para el método es:

$$\sigma^2 = \frac{\sum r_i^2}{(n-1)} \quad (4)$$

Esta varianza es solo una medida de la desviación de los datos de la curva, mas no de la pendiente (valor b).

El método de Máxima Probabilidad es el más recomendable para calcular el valor b , porque utiliza la media de las magnitudes. Por lo tanto, los eventos aislados que sobrepasen la magnitud promedio no van a afectar los resultados. Para una muestra grande, el error estándar (σ) de b (Shi & Bolt, 1982) es:

$$\sigma(b) = 2.3b^2\sigma(M) \quad (5)$$

donde

$$\sigma^2(M) = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - [M])^2}{(n-1)} \quad (6)$$

M es la magnitud promedio y n es el tamaño de la muestra. En este estudio también se estimó la probabilidad de que dos muestras fueran de la misma población, según el método de Utsu (1992), con el fin de analizar diferentes zonas espacialmente.

2. Metodología

En el presente trabajo se utilizaron los registros de sismos vulcano-tectónicos (VT) del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM), obtenidos por la red sísmica de vigilancia y monitoreo de la actividad volcánica del VNR desde 1985 hasta 2002, registrados analógicamente y digitalmente. Esta red cuenta con ocho estaciones (Figura 1). Los sensores son de componente vertical con una frecuencia natural de 1Hz, modelo L4-C, *Mark Products*, y una masa de 1 Kg. La telemetría está compuesta por VCO's modelo J-502 y J-502A del USGS y Sprengnether tipo AS-110, TC-10 acoplados a discriminadores modelo J-110 del USGS.

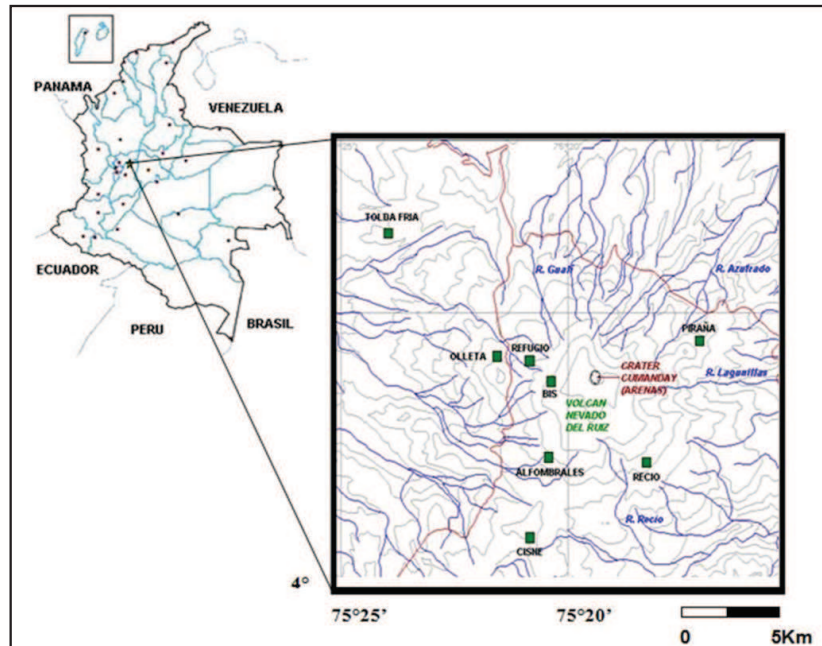


Figura 1. Localización del área de estudio y estaciones sísmicas usadas (rectángulos)

Se seleccionaron inicialmente 10309 sismos VT en registros analógicos y digitales, los cuales se relocizaron usando el modelo de velocidades propuesto por Londoño (2002) para el VNR. Para el cálculo de la magnitud de los eventos sísmicos VT se utilizó la ecuación en función de la coda definida por Nieto, Brandsdóttir & Muñoz (1990) para el VNR. Estos fueron los datos básicos para crear el catálogo sísmico desde 1985 hasta 2002 y utilizar la técnica de Gutenberg & Richter (1944) para el cálculo del valor b , mediante el programa de computador ZMAP (Wiemer & Wyss, 1997). Con la ayuda de dicho programa, se definió la magnitud de completitud o magnitud umbral y se calculó el valor b con los métodos de Máxima Probabilidad y Mínimos Cuadrados Pesados descritos anteriormente. Del número inicial de sismos se seleccionaron finalmente 2769 con magnitudes comprendidas entre 0.7 y 2.5, lo que garantizaba un catálogo completo para éste rango de magnitudes (más adelante). La Figura 2 muestra la localización hipocentral de los sismos seleccionados, a partir de los cuales se realizarán los cálculos del valor b .

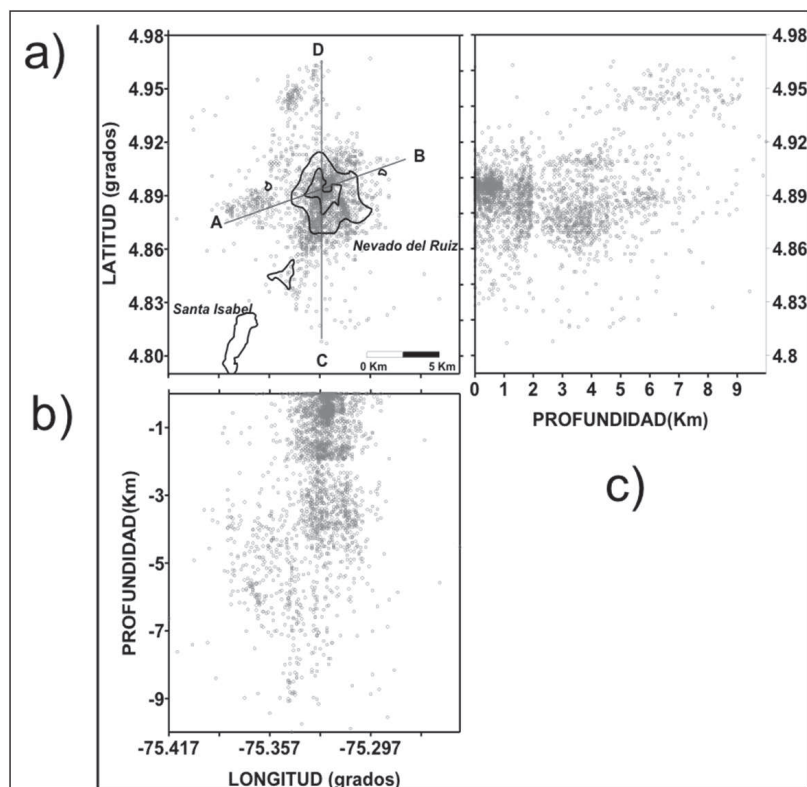


Figura 2. Localización hipocentral de sismos seleccionados para el estudio. a) vista en planta. AB y CD representan perfiles EW(b) y NS (c), respectivamente.

La Magnitud de Completitud (M_c) se calculó para el catálogo de datos, utilizando los valores acumulados del número de eventos contra la magnitud, con una calidad de ajuste del 95%. El valor obtenido fue de 0.2; sin embargo, se escogió $M_c = 0.7$, para garantizar un catálogo más completo y homogéneo. A partir de este resultado se creó el catálogo final para una $M_c = 0.7$ con los 2769 sismos seleccionados.

En el cálculo espacial del valor b se utilizó una densa retícula de puntos. Para cada nodo de la retícula, se tomaron los epicentros más cercanos y se estimó la calidad de ajuste de la distribución frecuencia-magnitud observada, mediante la utilización del algoritmo de Wiemer & Wyss (1997). En dicho algoritmo se toma un volumen (radio constante) o un número de sismos constante para cada nodo. En este trabajo, se tomó un número constante de 100 sismos para el cálculo de b en planta y un radio constante de 2.5 Km para el mapa tridimensional (Figura 3a).

Para la elaboración del mapa total en planta de b , se utilizó un espaciamiento entre nodos de 1.3 Km, mientras en la elaboración del mapa tridimensional, se tuvo un espaciamiento entre nodos de 0.35 Km tanto para la horizontal como para la vertical igualmente después de realizar varias pruebas con diferentes espaciamientos. Un factor a tener en cuenta antes de analizar cualquier resultado de b , es la resolución, la cual permite establecer el radio en kilómetros donde estarían ubicados los sismos necesarios para el cálculo de b . En el caso de este trabajo, es el radio necesario para encontrar 100 sismos a partir de un nodo, cuyo mayor radio utilizado por cada nodo para el cálculo de b , no sobrepasó los 3 Km, lo cual indica una buena resolución para todo el área del VNR (Figura 3a).

Igualmente, el análisis del error obtenido en el valor de b para cada nodo, es otro factor a tener en cuenta antes del análisis de b . La Figura 3b muestra la distribución espacial del error de b obtenido para cada nodo usando el método de Máxima probabilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede decir que los valores de b obtenidos se consideran muy constreñidos, dado que los errores son aceptables en la gran mayoría de los nodos, estando en el rango de 0.05 a 0.20 para un 80% del área del VNR. Hacia el SW y SE del cráter Arenas, algunos valores de b , presentan un error un poco mayor (0.25). Los mayores errores se encontraron en la parte norte, alcanzando valores hasta de 0.4. Sin embargo, este sector no es relevante desde el punto de vista de la actividad del volcán y por lo tanto no influye en los resultados y el análisis espacial de los valores de b para este estudio.

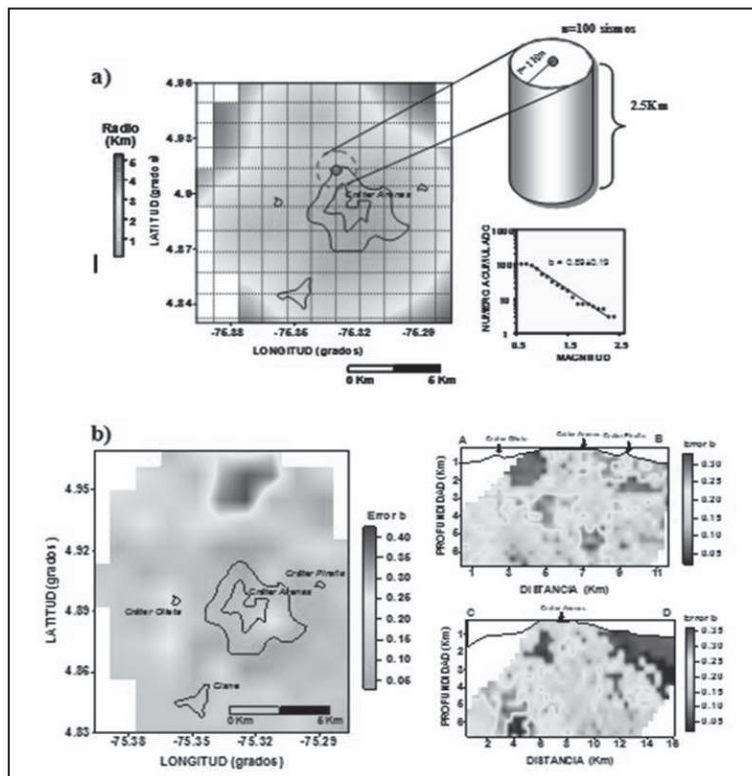


Figura 3. a) Ejemplo de cálculo del valor b para el área del VNR.
 b) distribución espacial del error de b obtenido para cada nodo usando el método de Máxima Probabilidad para el VNR.

3. Resultados y discusion

Una vez realizados los análisis de error y resolución, se procedió a analizar los resultados obtenidos para el valor de b . La figura 4 muestra la distribución espacial para $z=0\text{Km}$ de b usando los métodos de Máxima probabilidad y de Mínimos cuadrados pesados. Los resultados de ambos métodos son muy similares, lo que indica que los valores de b obtenidos para el VNR son independientes del método utilizado. No obstante, como se mencionó anteriormente, se escogió el método de máxima probabilidad para el análisis por presentar una mayor estabilidad en el cálculo de b . Se pudieron observar cuatro anomalías (altos valores de b) importantes; la primera (A), localizada al oeste del cráter Arenas, justo al sur del cráter la Olleta con valores de b de hasta 1.8 en la parte superficial (1 Km) y de 1.3 en la parte más profunda (6 Km).

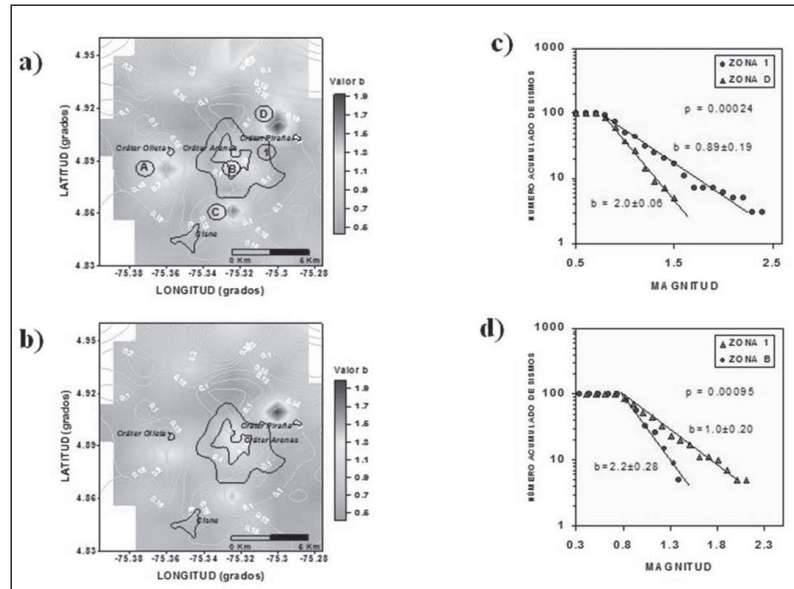


Figura 4. Distribución espacial para $z=0\text{Km}$ del valor- b usando los métodos de Máxima Probabilidad (a y c) y de Mínimos Cuadrados Pesados

La segunda zona (B), ubicada bajo el cráter Arenas, presentó valores b de 1.4. La tercera zona (C), al sur del cráter Arenas, tuvo valores b de hasta 1.7. Por último, la cuarta zona (D), al NE del cráter, con valores b mayores a 1.7. Existe también una zona anómala al norte del cráter Arenas, pero esta zona no se considera en el presente estudio debido a que la resolución en ella es muy pobre y el error muy grande.

Antes de realizar cualquier interpretación, se requiere comprobar si los valores de b en las zonas mencionadas son reales y no producto de artificios matemáticos. Para ello, se realizó un análisis de la distribución frecuencia-magnitud para unas zonas seleccionadas denominadas zonas A, B, C y D, y se compararon con una zona de valor normal de b , denominada zona 1. La Figura 4c y 4d muestra la relación entre las zonas 1, B y D. De esta figura se puede concluir que la diferencia entre las zonas es real, y que no obedece a artificios matemáticos del algoritmo, dado que la probabilidad (p) de que cada una de las distribuciones de las zonas provenga de la misma población es muy baja según Utsu (1992), lo que indica una clara y real diferencia en el valor de b entre las zonas. Para las zonas C y A no se muestran los resultados en la Figura 4, pero igualmente se calculó la probabilidad y los resultados muestran la misma tendencia (relación zona 1 y A, $p=0.00033$; relación zona C y 1, $p= 0.0089$).

En la Figura 5 (con los mismos perfiles de la figura 2), se presentan mapas de b para diferentes profundidades; 0, 3 y 6 Km. También muestra un corte SW-NE y otro NS pasando por el cráter Arenas. A cada lado del corte se proyectaron los sismos comprendidos entre 0 y 3 Km.

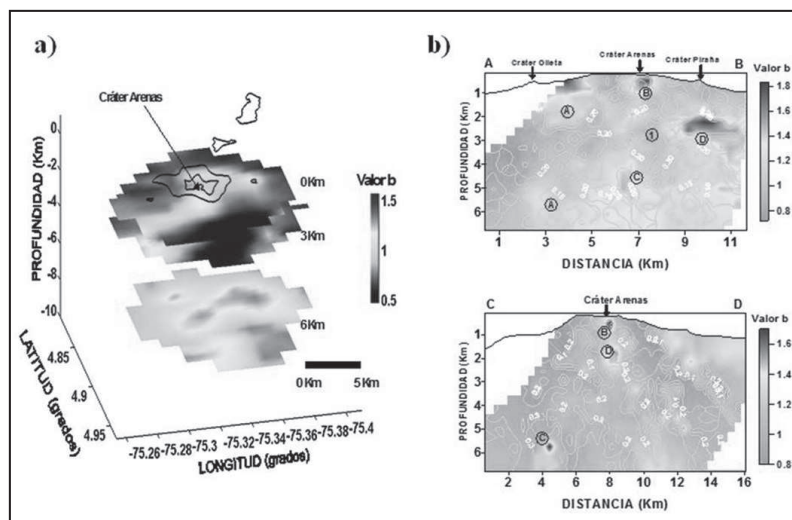


Figura 5. Mapeo 3D del valor- b en la zona del VNR usando el método de máxima probabilidad. a) Distribución espacial del valor- b tanto en planta como en profundidad. b) Perfiles AB (EW) y CD (NS) mostrando la distribución del valor b .

La zona A se puede interpretar como una zona asociada a acumulación o alimentación de material magmático en profundidad (6 Km) y a un sistema hidrotermal o acumulación de fluidos en su parte más superficial (1 Km), soportado esto en varios hechos. Por un lado, Sturchio et al. (1988), pudieron diferenciar dos fuentes de fluidos en el área del VNR; una fuente hacia el oeste del cráter y otra hacia el este. La fuente localizada al oeste, la consideran de origen magmático debido a la naturaleza de los fluidos y asumen que debe existir una zona magmática en profundidad para alimentar dicha zona de fluidos en la parte superficial. Por otro lado, Londoño (2002) usando tomografía sísmica pudo definir una zona localizada al oeste del cráter, asociada con posible acumulación de material magmático. Igualmente, Londoño & Sudo (2001), realizaron un análisis de la actividad sísmica del VNR y sostienen que la zona al oeste del mismo, debe estar asociada con material magmático debido a su estrecha relación con la actividad volcánica reciente de tipo freato-magmática. Es interesante el hecho de que la zona A esté ubicada prácticamente en el mismo sitio donde

existe una zona de baja velocidad sísmica a poca profundidad. Este hecho ayudaría a corroborar la suposición de que el sector oeste es una zona importante en la actividad del VNR (Londoño & Sudo, 2001).

En conclusión, como se mencionó anteriormente, esta zona anómala de b al parecer, está dividida en dos porciones: una más superficial (1 Km) y otra a unos 6 Km. Es muy posible que la porción superficial pueda estar asociada al sistema hidrotermal superficial del VNR y podría representar además, una zona de acumulación de fluidos y gases.

Es reconocido que la acumulación de fluidos y presión de poros, y el aumento de temperatura pueden incrementar el valor de b (McNutt & Jolly, 1999), fenómenos que en esta zona es muy probable que sucedan, de acuerdo a estudios geoquímicos y geofísicos. Por otra parte, la zona más profunda (6 Km), es probable que esté asociada con una zona de alimentación magmática aún no identificada plenamente en el VNR. Aunque análisis geoquímicos, estudios detallados de la sismicidad en ese sector, al igual que estudios de análisis espectrales de señales sísmicas, y estudios tomográficos para el mismo sector, indican que es posible que exista una zona de alimentación magmática al oeste del cráter (Londoño & Sudo, 2001; Londoño, 2002), hasta ahora no había sido posible definirla claramente. Sin embargo, el análisis espacial del valor b realizado en este estudio, comprueba la presencia de una zona anómala al oeste del VNR.

La zona B, podría asociarse con una $z=1$ Km de acumulación de gases y fluidos a temperaturas relativamente altas, justo debajo del cráter Arenas, activo en la actualidad, interpretación coherente con resultados obtenidos en estudios tomográficos en el mismo sector realizados por Londoño (2002), por lo tanto, esta zona podría estar representando parte del sistema hidrotermal superficial del VNR. Existe evidencia suficiente para soportar esta interpretación, basándose únicamente en la observación fenomenológica, ya que es evidente que la actividad fumarólica en el cráter activo es prácticamente constante desde 1985, con temperaturas en la superficie del cráter que pueden llegar a más de 50°C, las cuales pueden ser consideradas elevadas si se tiene en cuenta que la altura del volcán es más de 5 Km sobre el nivel del mar y que existe una gruesa cubierta de hielo sobre el volcán, lo que hace que la temperatura disminuya drásticamente a esas alturas, pero que corresponderían a temperaturas del punto de ebullición del agua en alturas mucho más bajas y sin la presencia de hielo (Barberi, Martini & Rossi, 1990). Por otro lado, muchos sismos de Largo-Período (LP) se localizan en dicho sector del cráter activo. Es bien sabido que este tipo de sismicidad volcánica está asociada a movimiento de fluidos, gases o material magmático. Gil (1987) propone una zona ubicada

en el mismo sector de la zona B como una fuente sísmica de tales sismos LP.

La zona C podría estar asociada a una zona de presencia de material magmático remanente. Varias líneas de evidencia apuntan a esta interpretación:

- Existe una clara anomalía de baja velocidad en la onda S a esa profundidad y en el mismo sector (Londoño, 2002),
- Melson et al. (1990), basados en estudios petrológicos y geoquímicos de la erupción freato-magmática ocurrida en noviembre de 1985, sostienen que la profundidad más probable de la ubicación de la cámara magmática del VNR estaría a 6 Km bajo el cráter activo,
- La sismicidad asociada a actividad del VNR, está localizada por encima de los 6 Km, lo que sugiere una zona asísmica por debajo de esa profundidad, que bien podría corresponder con la ubicación de una zona magmática.

Por último, la zona D, igualmente podría representar otro sector de alimentación magmática. Gil (1987) propone una zona localizada en dicho sector, como la ubicación en profundidad de la fuente sísmica de un tipo de temblor volcánico más profundo que otro superficial (1-2 Km) registrado en cercanías del cráter activo y al sur del mismo, por lo que considera esta zona como la posible ubicación de material magmático que genera dicha señal sísmica.

Por otra parte, la zona de la Piraña, mostró una pequeña deformación del terreno antes de algunas crisis volcánicas (Gil, 1987), lo que sugiere la posible localización de una zona de acumulación magmática en dicho sector. Igualmente, Sturchio et al. (1990) sugieren que un incremento transitorio en las fuentes termales ácidosulfocloradas localizadas al este del volcán, estuvo relacionado con la erupción de noviembre de 1985.

Muñoz, Nieto & Meyer (1990) proponen que el sistema de alimentación magmático del VNR, estaría compuesto de muchas ramificaciones, más bien que una sola zona de alimentación, hecho que coincide con la distribución de diferentes zonas anómalas de b , alrededor del cráter activo.

4. Conclusiones

- Los resultados obtenidos en este estudio de la distribución espacial de la relación frecuencia-magnitud o valor b , comprueban una vez más, que el método de mapeo tridimensional de dicho valor es una herramienta muy útil para delimitar zonas de acumulación magmática en zonas volcánicas, como lo sugieren estudios anteriores

(Wiemer & Benoit, 1996; Wiemer et al., 1996; Wyss et al., 1996; Wyss et al., 1997). La evidencia más clara de ello, es la estrecha correlación que existe entre los resultados obtenidos con el mapeo tridimensional del valor b , y los resultados obtenidos para el mismo sector con técnicas más sofisticadas como la tomografía sísmica, ampliamente utilizada y validada para la determinación de la estructura interna de la tierra.

- Se pudieron definir cuatro zonas anómalas de b en el VNR, localizadas, una al oeste del cráter activo ($b=1.3-1.8$) cerca al cráter la Olleta asociada con un sistema hidrotermal en superficie ($z=1\text{Km}$) y una zona de alimentación magmática en profundidad ($z=6\text{ Km}$); otra zona ($b=1.4$) ubicada bajo el cráter activo Arenas ($z=1\text{Km}$) asociada con un sector de acumulación de vapor y fluidos que harían parte del sistema hidrotermal del VNR; otra zona ($b=1.7$) localizada al sur del cráter activo ($z=6\text{ Km}$) asociada posiblemente a la localización de una de las cámaras magmáticas del VNR; y otra zona ($b=1.7$) ubicada al NE del cráter activo ($z=3\text{Km}$) cerca al cráter la Piraña, asociada también a una zona de alimentación magmática.

Referencias bibliográficas

- AKI, K. (1965). Maximum Likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. In: Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 43, Tokyo (Japan): University of Tokyo, p. 237-239. ISSN: 0040-8972.
- BARBERI F.; MARTINI, M. & ROSSI, M. (1990). Nevado del Ruiz (Colombia): Pre-eruption observations and November 13, 1985 catastrophic event. In: Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 42, Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 1-12. ISSN: 0377-0273.
- BENDER, B. (1983). Maximum Likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. In: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, No. 3. (jun), Albany (CA, USA): Seismological Society of America. p. 831-851. ISSN: 0037-1106.
- CASAS, L. (1991). El Valor b como premonitorio de fases eruptivas en el Volcán Nevado del Ruiz, Período 1986-1990. Tesis de grado (Geólogo). Manizales (Colombia): Universidad de Caldas, 89 p.
- GIL, F. (1987). Análisis preliminar de tremor y eventos de largo período registrados en el Volcán Nevado del Ruiz, Septiembre 1985 a Julio 1986. En: Revista CIAF, Vol. 11, No. 1-3, Bogotá (Colombia): Centro Interamericano de Fotointerpretación, CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 13-45. ISSN: 0120-2499.
- GUTENBERG, R. & RICHTER C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. In: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34 (oct), Albany (CA, USA): Seismological Society of America. p. 185-188. ISSN: 0037-1106.
- KNOPOFF, L.; KAGAN, K. K. & KNOPOFF, R. (1982). b Values for foreshocks and aftershocks in real and simulated earthquake sequences. In: Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 72, No. 5 (oct). Albany (California, USA): Seismological Society of America. p. 1663-1676. ISSN: 0037-1106.
- LONDOÑO, J. M. & SUDO, Y. (2001). Spectral Characteristics of Volcano-tectonic earthquake swarms in Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. In: Journal of Volcanology Geothermal Research, Vol. 112, No. 1-4 (dec). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 39-54. ISSN: 0377-0273.

- LONDOÑO, J. M. (2002). A seismic model for the volcanic activity of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Tesis doctoral (PhD en Geociencias). Kyoto (Japón): Universidad de Kyoto. 96 p.
- MCNUTT R. S. & JOLLY D. A. (1999). Seismicity at the volcanoes of Katmai National Park, Alaska; July 1995 - December 1997. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 93, No. 3 (nov). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 173-190. ISSN: 0377-0273.
- MELSON, W. G.; ALLAN, J. F.; JEREZ, D. R.; NELEN, J.; CALVACHE, M. L.; WILLIAMS, S. N.; FOURNELLE, J. & PERFIT, M. (1990). Waters contents temperatures and diversity of the magmas of the catastrophic eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, November 13, 1985. In: *Journal Volcanology Geothermal Research*, Vol. 41, No. 1-4 (jul). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 97-126. ISSN: 0377-0273.
- MUÑOZ, C. F.; NIETO, E. A. & MEYER, H.J. (1990). Analysis of swarms of high-frequency seismic events at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia (January 1986-August 1987): Development of a procedure. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 41, No. 1-4 (jul). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 327-354. ISSN: 0377-0273.
- NIETO, A. H.; BRANDSDÓTTIR, B. & MUÑOZ, C. F. (1990). Seismicity associated with the reactivation of Nevado del Ruiz, Colombia, July 1985 - December 1986. In: WILLIAMS, S. N. (Editor), *Nevado del Ruiz volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 41, No. 1 (jul). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 315-316. ISSN: 0377-0273.
- SHI, Y. & BOLT, B. (1982). The standard error of the magnitude frequency b value. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol., 72, No. 5 (oct). Albany (CA, USA): Seismological Society of America. p. 1677-1687. ISSN: 0037-1106.
- STURCHIO, N.C.; STANLEY, N.W.; GARCÍA, N.P. & LONDOÑO, A.C. (1988). The hidrotermal system of the Nevado del Ruiz, Colombia. In: *Bulletin of Volcanology*, Vol. 50, No. 6 (dec). nd: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI). p. 399-412. ISSN: 0258-8900.
- STURCHIO, N.C.; WILLIAMS, S.N.; CALVACHE, M.L.; MÉNDEZ, R.; LONDOÑO, C.A. & GARCÍA, P. (1990). Sulfur dioxide form Nevado del Ruiz volcano, Colombia: total flux and isotopic constrains of its origin. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 42, No. 1-2 (jul). Cambridge (MA, USA): Elsevier. p. 53-68. ISSN: 0377-0273.
- UTSU, T. (1965). A method for determining the value b in formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes. In: *Geophysical Bulletin of the Hokkaido Unversity*, Vol. 13. Hokkaido (Japan): The Hokkaido University. p. 99-103. ISSN: 0439-3503
- UTSU, T. (1992). On seismicity. In: *Report of the Joint Research Institute for Statistical mathematics*. Tokyo (Japan): The Institute for Statistical Mathematics. p. 139-157.
- WESNOUSKY, S.G. (1994). The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, Which is it?. In: *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 6 (dec). Albany (CA, USA): Seismological Society of America. p. 1941-1959. ISSN: 0037-1106.
- WIEMER, S. & BENOIT, J. (1996). Mapping the b value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones. In: *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 13. Malden (MA, USA): American Geophysical Unión - John Wiley & Sons Inc. p. 1557-1560. ISSN: 1944-8007.
- WIEMER, S. & WYSS, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B7. Malden (MA, USA): American Geophysical Unión - John Wiley & Sons Inc. p. 15115-15128. ISSN: 2156-2202.
- WIEMER, S. & WYSS, M. (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States and Japan. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 4 (aug). Albany (CA, USA): Seismological Society of America. p. 859-869. ISSN: 0037-1106.
- WIEMER, S.; MCNUTT, S.R. & WYSS, M. (1997). Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency-magnitude distribution near Long Valley Caldera, California. *Geophysical Journal International*, Vol. 134, No. 2 (aug). London (UK): Royal Astronomical Society. p. 409-421. ISSN: 1365-246X. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-246x.1998.00561.x/pdf>> [consult: 23/11/2013].

- WIEMER, S.; MCNUTT, S.R.; WYSS, M. & SHIMAZAKI, K. (1996). Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska [online]. In: Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 2 (jan), Malden (MA, USA): John Wiley & Sons. p. 189-192. ISSN: 1944-8007 <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96GL03779/abstract>> <DOI: 10.1029/96GL03779> [consult: 23/11/2013].
- WYSS, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. In: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 31, No. 1 (mar). Malden (MA, USA): John Wiley & Sons Inc. p. 341-359. ISSN: 1365-246X.
- WYSS, M.; SHIMAZAKI, K. & WIEMER, S. (1997). Mapping active magma chambers by b values beneath the off-Ito volcano, Japan. In: Journal of Geophysical Research. Vol. 102, No. B9 (sep). Malden (MA, USA): American Geophysical Union - John Wiley & Sons Inc. p. 20413-20422. ISSN: 2156-2202.