

Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia

Condori Quispe Cristóbal^{1,2}, Jhon Leandro Pérez^{3,4}

¹Instituto Geofísico del Perú-Ciencias de la Tierra Sólida, IGP

²Posgrado, Instituto de Geociencias, Universidad de Brasília, UnB

³Grupo Georriesgos, Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano, OSSO

⁴Posgrado, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE

cristobal.condori@igp.gob.pe; jhonper@cicese.edu.mx

Resumen

Colombia es uno de los países de Suramérica con alta actividad sísmica, debida a la complejidad tectónica que se presenta por la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y Suramérica. La principal actividad sísmica en el país está asociada al proceso de subducción de las placas Nazca y Suramérica, dando origen a sismos con focos superficiales, intermedios y profundos. Particularmente, cerca de la zona de subducción en el suroccidente de Colombia, se han presentado sismos destructivos de profundidad intermedia.

En el presente trabajo se realiza el análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en función de la profundidad para sismos de foco intermedio, con el objetivo de contribuir al estudio de la sismicidad de la región del Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. Para este fin, se emplearon eventos que fueron extraídos del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), con magnitud de completitud mayor a $2.3M_l$ para el periodo comprendido entre 1993 y 2013. Los resultados muestran que el valor de b oscila entre 0.6 y 1.3 con clara disminución en función de la profundidad. Esta variación se relaciona con los cambios de las propiedades físicas (por ejemplo, heterogeneidad y deformación interna) de la placa Nazca dentro de la región de estudio, a causa del incremento de los esfuerzos a medida que ésta subduce. Este proceso genera un aumento en la ocurrencia de sismos con magnitudes $M \geq 6.5M_l$, para los cuales se estimaron periodos de retorno local de 20 a 40 años.

Palabras clave: valor de b , placa Nazca, valle del Cauca.

Introducción

En Sismología, el valor de b es importante en el estudio de las regiones sísmicamente activas y puede reflejar las propiedades físicas de la tectónica en una región determinada (Warren y Latham, 1970; Wyss, 1973; Kossobokov y Keilis-Borok, 2000). El valor de b comúnmente se relaciona con el cambio de los niveles de esfuerzo, la heterogeneidad del material (Mogi, 1962; Scholz, 1968), la deformación, presión de poros, la temperatura, la edad de la placa y acoplamiento de la misma (Wiemer y Beniot, 1996; Gerstenberg

et al., 2001, Ávila-Barrientos, et al., 2015). Además, puede servir en el análisis de sismos precursores a partir de la identificación de asperezas en zonas de subducción y fallas geológicas (Wiemer y Wyss, 1997; Condori y Tavera, 2010).

Wiemer y Beniot (1996), Monterroso y Kulháněk (2003), Lin et al. (2008) y Enescu et al. (2009) a partir del análisis de la variación del valor de b en función de la profundidad en zonas de subducción, sugieren que el incremento de este valor se asocia con la

deshidratación de la placa y aumento sucesivo de la presión de poro en la parte superior de la litósfera descendente. Los valores bajos de b (anomalías) en la parte inferior de la placa estarán asociados con el alto gradiente térmico existente entre la litosfera y el manto. En general, la dependencia del valor de b con la profundidad puede reflejar el grado de heterogeneidad de los materiales y las condiciones de esfuerzos de la corteza (Mogi, 1962; Scholz, 1968).

En el presente trabajo se realiza el análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en función de la profundidad para sismos de foco intermedio, con el objetivo de contribuir al estudio de la sismicidad de la región del Valle del Cauca, suroccidente de Colombia.

Zona de estudio y características sismotectónicas

Colombia forma parte de las regiones sísmicas más activas del mundo debido a que se encuentra ubicado dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, en donde se libera más del 80% de la energía sísmica a nivel mundial. El complejo esquema tectónico que se presenta en el país es consecuencia de la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe, y Suramérica. La placa Nazca se desplaza con un movimiento relativo de entre 50 mm/año y 78 mm/año, la placa Caribe entre 10 y 22 mm/año y la placa Suramérica entre los 6 y 16 mm/año (Pennington, 1981; Kellogg et al., 1989; Freymueller et al., 1993; Kellogg y Vega, 1995; Gutscher et al., 1999; Taboada et al., 2000; Trenkamp et al., 2002; Trenkamp et al., 2004; Suter et al., 2008) (Figura 1).

Los movimientos relativos de estas placas durante la era Cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, que comprende una extensa zona de deformación continental limitada por el cratón sudamericano al oriente y por la convergencia de las placas de Nazca y Caribe, al occidente y al norte respectivamente (Figura 1). Los Andes del Norte se divide en el territorio colombiano en tres cordilleras: Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera Oriental; en todas estas formaciones existen distintas cadenas montañosas, separadas por valles y depresiones intramontañosas (Figura 1). Estas condiciones tectónicas han generado

diversos procesos de deformación en la corteza continental, actividad volcánica y sísmica en el país (Taboada et al., 2000).

Varios autores (Pennington, 1981; Monsalve, 1998; Corredor, 2003; Collot et al., 2004; Arcila y Dimaté, 2005; Pedraza, 2006), a partir del análisis integrado de la sismicidad, los mecanismos focales de los terremotos y la morfología de la fosa Colombiana, argumentan la existencia de al menos tres segmentos activos de la zona de subducción con características diferentes (Figura 2). Los datos más recientes los reportan Arcila y Dimaté (2005), quienes los describen como: a) Segmento Norte, que representa la subducción

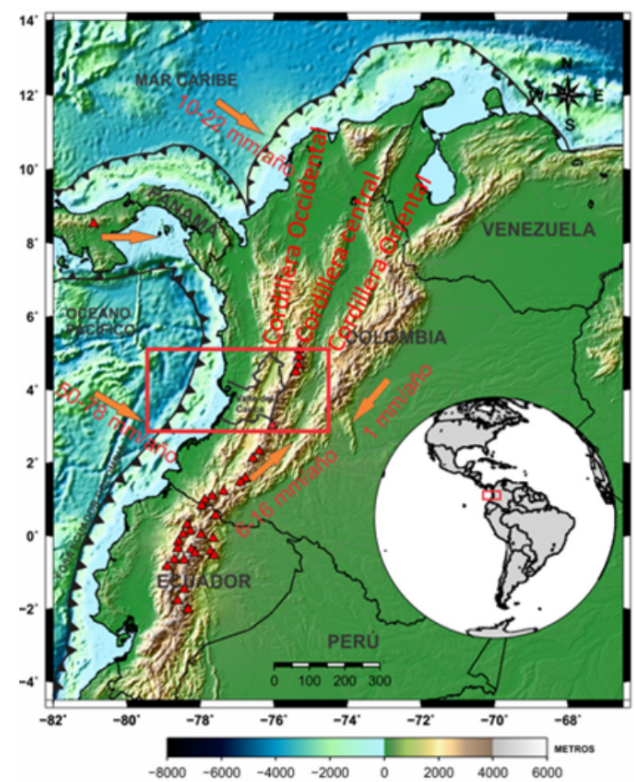


Figura 1. Movimiento relativo entre las placas tectónicas de Nazca, Suramérica y Caribe en la esquina noroccidental de América del Sur (los valores de movimiento relativo fueron tomados de Pennington, 1981; Kellogg et al., 1989; Freymueller et al., 1993; Kellogg y Vega, 1995; Gutscher et al., 1999; Taboada et al., 2000; Trenkamp et al., 2002; Trenkamp et al., 2004; Suter et al., 2008). El polígono rojo corresponde al área de estudio y los triángulos rojos a los volcanes activos.

del bloque Coiba bajo el extremo noroeste de Colombia. Aquí la fosa tiene una longitud de 170 km. Este segmento está orientado a 130° de azimut. Su plano de Benioff buza a 25° hacia los 40° . La magnitud máxima calculada es de $7.8M_w$; b) Segmento Centro, con una longitud en la fosa de 160 km; se orienta hacia los 20° de azimut y su plano de Benioff definido bajo el Viejo Caldas buza a 40° hacia los 110° ; la magnitud máxima estimada también es de $7.8M_w$; y c) Segmento Sur, cuyo tramo de fosa está orientado a 40° de azimut y tiene una longitud de 550 km. El plano de Benioff buza 30° hacia los 130° y la magnitud máxima calculada es $8.8M_w$.

El Segmento Central y Sur, son los que afectan

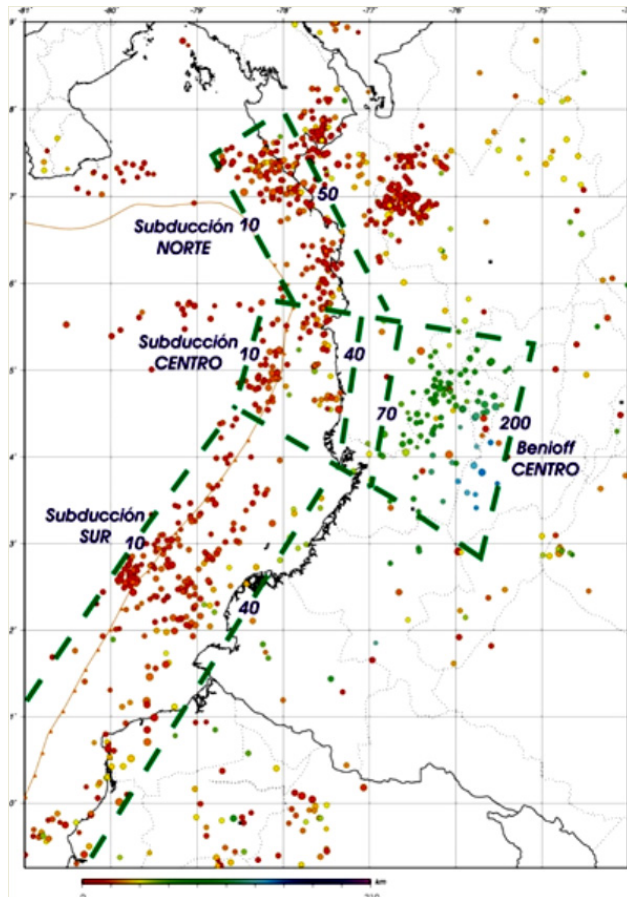


Figura 2. Segmentación de la zona de subducción de Colombia (Tomado de Arcila y Dimaté, 2005).

en gran medida el departamento del valle del Cauca y zonas aledañas. En esta región hay tres tipos de fuentes sismogénicas (INGEOMINAS, 2005): 1) la trinchera, 2) la zona de Benioff, y 3) las fallas intracontinentales; más específicamente se encuentran, por ejemplo, el sistema de fallas Romeral y el sistema de fallas Cauca (Figura 3). De los terremotos que se tiene conocimiento por causar importantes impactos en el occidente y centro del país (Figura 4), pueden destacarse los sismos corticales (fuente 1) tales como los siguientes: el sismo de junio 7 de 1925 de magnitud $6.8M_s$ con intensidad de VII-VIII en la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98, por sus siglas en inglés), en el valle del Cauca, donde la ciudad de Cali presentó severos daños; el sismo de noviembre 23 de 1979 en Risaralda con magnitud $7.2M_w$ e intensidad VII EMS-98, cuyos efectos fueron en la región del Chocó y valle del Cauca; el evento de febrero 8 de 1995 con magnitud $6.4M_w$ entre el valle del Cauca y Risaralda, presentándose daños en las edificaciones de ambas regiones; el sismo de enero 25 de 1999 con magnitud $6.2M_w$ en el Quindío, cuyos efectos fueron devastadores en la ciudad de Armenia (Salcedo y Pérez, 2016).

De los eventos relacionados con el proceso de

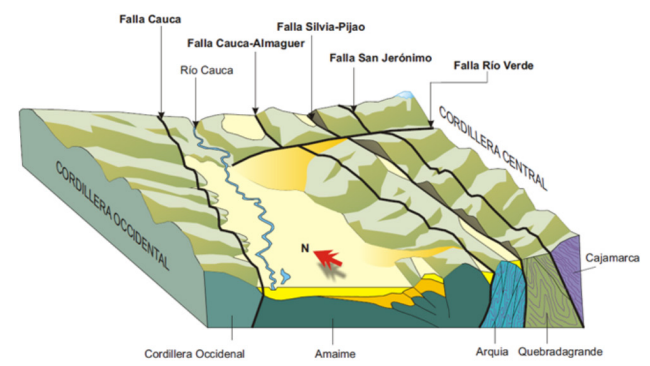


Figura 3. Esquema del sistema de fallas presentes en el área de estudio. Al occidente la falla Cauca, también conocida como el sistema de fallas Cauca-Patía. Al oriente del río Cauca, las fallas Cauca-Almaguer, Silvia-Pijao y San Jerónimo, que hacen parte del sistema de fallas Romeral (Tomado de López, 2006).

subducción (fuentes 1 y 2) se destacan, el sismo del 9 de julio de 1766 cuyos daños más importantes se observaron en las ciudades de Buga y Cali; el sismo de enero 31 de 1906 con magnitud $8.9M_w$ entre Colombia y Ecuador, que generó un tsunami cuyos efectos más graves fueron sobre la costa de los departamentos de Cauca y Nariño, dejando aproximadamente 1500 víctimas (Espinoza, 1992). A la ruptura generada por este evento se le asocian tres importantes sismos posteriores como el de mayo 22 de 1942 de magnitud $5.8M_s$, el de enero 19 de 1958 de $7.8M_w$ y el de diciembre 12 de 1979 de $8.1M_w$. También se destacan el terremoto de Julio 30 de 1962 con magnitud $6.9M_s$ en Caldas; el de diciembre 19 de 1991 de $7.2M_w$ relativamente cercano al de noviembre 15 de 2004, localizado en las costas de Bajo Baudó en el Chocó con una magnitud de $7.1M_w$. Ambos eventos generaron daños considerables en la infraestructura de la ciudad de Cali (capital del valle del Cauca). Otros eventos importantes recientemente

ocurridos son el de septiembre 30 de 2012 con magnitud $7.1M_w$ y epicentro cerca al municipio La Vega en el departamento del Cauca, el de febrero 9 de 2013 con magnitud $6.9M_w$ localizado cerca al municipio de Ospina (Cauca), y 13 de agosto del mismo año con magnitud $6.5M_w$, ubicado en Nuquí departamento del Chocó, sentido en todo el occidente del país y en la provincia del Darién cerca a Panamá (Salcedo y Pérez, 2016).

Datos

Los datos del catálogo sísmico de localizaciones y magnitudes, provienen de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), en el periodo comprendido entre los años 1993-2013. Se dispone de información de más de 1800 sismos con epicentros distribuidos a lo largo del valle del Cauca y zonas aledañas (Figura 5). Las profundidades de los eventos están entre 10 y 200 km, sin embargo, los datos fueron analizados y evaluados para el intervalo de profundidad de 50-150 km, es decir, la sismicidad de foco intermedio originados por el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, ya que, históricamente en este rango, se presentan los sismos de mayor impacto en la región

Metodología

Para el análisis, se aplicó a una base de datos sísmicos la relación frecuencia-magnitud (Gutenberg y Richter, 1944), que describe la distribución entre la frecuencia de ocurrencia y la magnitud de los mismos, de la siguiente manera:

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

Donde N es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M , a y b son parámetros constantes reales positivos, que caracterizan la actividad sísmica de una región en un periodo de observación determinado. El parámetro crítico de esta relación viene a ser el valor de b que define la pendiente de la recta de la distribución frecuencia-magnitud y físicamente se relaciona con los niveles de esfuerzos acumulados y liberados en una zona; este valor puede ser calculado con el ajuste lineal de mínimos cuadrados (Press et al., 1986) o a partir del método de máxima verosimilitud (Aki, 1965; Utsu, 1965).

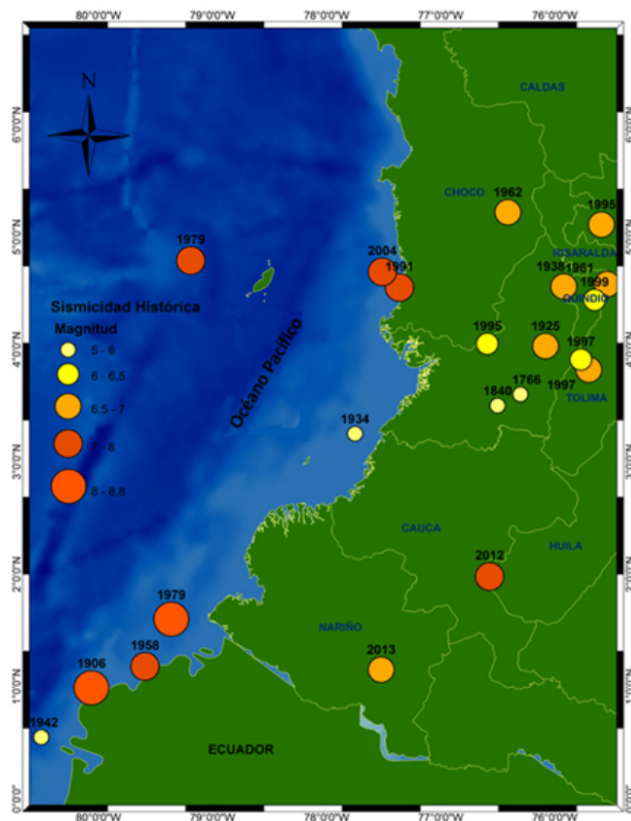


Figura 4. Localización de sismos históricos importantes con efectos en la región del valle del Cauca (Tomado de Salcedo y Pérez, 2016).

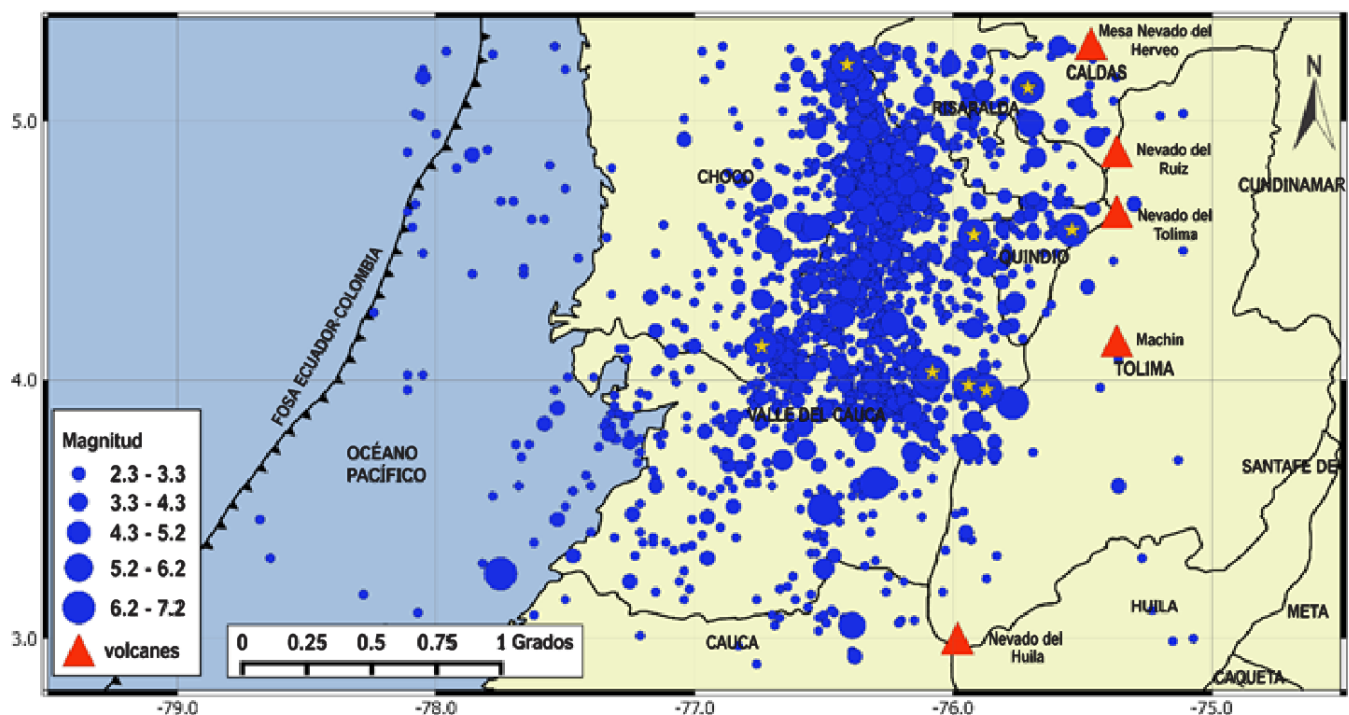


Figura 5. Distribución de la sismicidad con foco intermedio para el periodo 1993-2013. Las estrellas de color amarillo indican los principales sismos mayores a 6.5ML y los triángulos de color rojo corresponden a los volcanes activos.

En este trabajo se emplea el software ZMAP (Wiemer y Zuñiga, 1994; Malone y Wiemer, 2001) para el cálculo de los valores de a y b , y periodos de recurrencia. El método de máxima verosimilitud es el usado para estimar los valores de a y b , en tanto para el periodo de retorno local de sismos, se utiliza la siguiente relación (Wiemer y Wyss, 2002):

$$P_r(M) = T_L(M) = \frac{\Delta T}{10^{a-bM}} \quad 2)$$

donde ΔT es el periodo de datos considerado y la magnitud máxima del sismo es M , cuyo periodo de recurrencia se desea conocer. Tanto el método máxima verosimilitud como la relación de P_r , vienen incluidos como algoritmos en ZMAP.

La resolución de los valores de b depende de la homogeneidad del catálogo sísmico y de la magnitud de completitud (Wiemer y Wyss, 2000). En este sentido, siguiendo el procedimiento de Wiemer y Wyss (1997), para realizar un buen

análisis de los datos es importante tener en cuenta tres aspectos: 1) homogeneizar el catálogo, 2) fijar magnitud de completitud (M_c) y 3) eliminar réplicas. En este caso, los eventos considerados como réplicas fueron eliminados del catálogo utilizando el algoritmo de Reasenber (1985) que viene incluido también en ZMAP.

Para calcular los valores de a y b en el programa ZMAP se requiere de una serie de parámetros, tales como las dimensiones de una grilla (x , y) del área de estudio, la magnitud mínima de completitud del catálogo, la dimensión del radio para el trazado de círculos, etc. Estos parámetros básicamente dependerán de la densidad de datos con que se cuente y de las características sísmicas de la región de estudio, tales como longitudes de ruptura y áreas de ruptura de los eventos principales, fuentes sismogénicas y distribución espacial de la sismicidad.

El procedimiento a seguir se muestra en la Figura 6. Primero se cuenta con un mapa sísmico homogéneo y con una magnitud de completitud definida (Figura 6a). Seguidamente, se procede a crear un reticulado de celdas (6b), o mallas, bordeando toda la región de estudio (Figura 6c). A partir de cada nodo de las celdas se generan áreas de circunferencias con un radio de muestreo constante, el cual considera como origen el nodo de cada celda (Figura 6d). El espaciamiento de la malla, y el volumen circular dependerán principalmente del número de sismos contenidos en el área de estudio. Es por eso que los parámetros de entrada deben ser bien definidos, para reducir los errores en el cálculo del valor de b . Para este estudio se fijó espaciamientos de 0.02° de latitud y longitud, equivalente a 2 km de largo y ancho, y se consideraron volúmenes esféricos de 150 km de radio. La curva de distribución de la relación Gutenberg-Richter es calculada para cada volumen circular y a partir de esta curva, los valores a y b son estimados con el método de máxima verosimilitud. Finalmente, se genera un mapa o tomografía del valor de b en escala de colores a partir de una interpolación con el método kriging (Figura 6e).

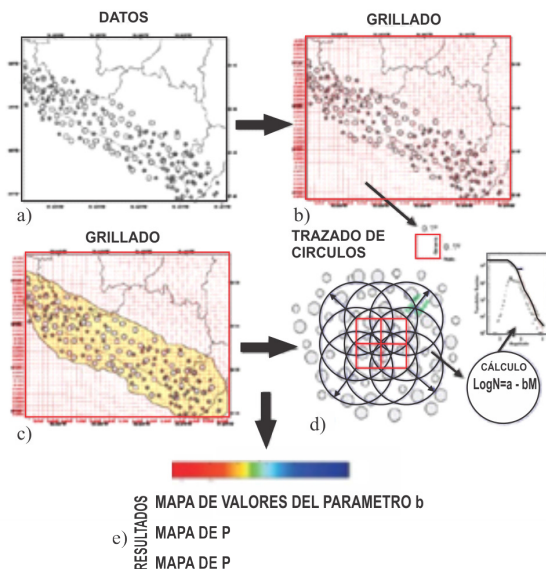


Figura 6. Esquema de la secuencia para el cálculo del valor de b . a) Mapa sísmico homogéneo; b) creación de la grilla; c) delimitación del área de estudio; d) radio de muestreo, e) resultados cuyos valores se muestran en escala de colores (Tomado de Condori, 2011).

Análisis y Resultados

Las profundidades de los eventos están entre 10 y 200 km, donde la sismicidad superficial se encuentra entre 10 y 50 km y es la de mayor frecuencia. Sin embargo, a profundidades mayores de 50 km, hay mayor distribución y concentración de la sismicidad (Figuras 7a y 7b).

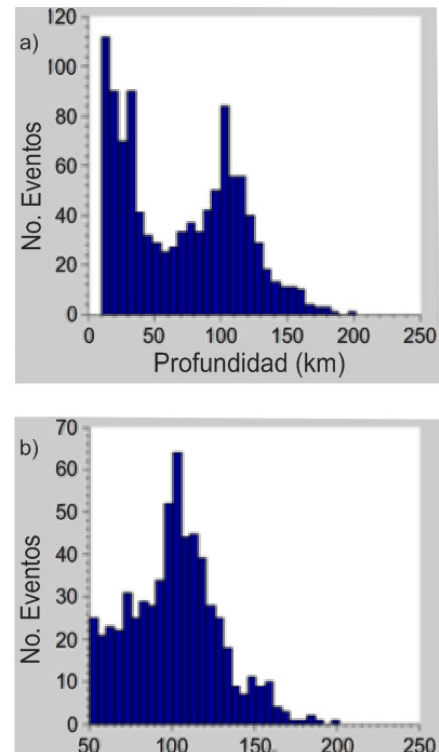


Figura 7. Histograma de frecuencia de sismos en función de la profundidad. a) Catálogo completo; b) sismicidad intermedia a profunda.

El número de eventos independientes acumulados para la región de estudio se muestra en la Figura 8. La pendiente es relativamente constante y la frecuencia es relativamente homogénea en el tiempo. Esto indica una buena calidad de los datos contenidos en el catálogo sísmico utilizado. La Figura 9 muestra el gráfico de número acumulativo de sismos contra magnitud de la relación Gutenberg-Richter, determinándose el valor de b $b=0.763 \pm 0.02$ con una magnitud mínima de completitud (M_c) de $2.3M_l$ y una magnitud máxima probable mayor de $6.5M_l$, para toda la base de datos.

utilizada en este estudio. Los valores de b varían espacialmente entre 0.6 a 1.3 para la región (ver Figura 10 y Anexo 1).

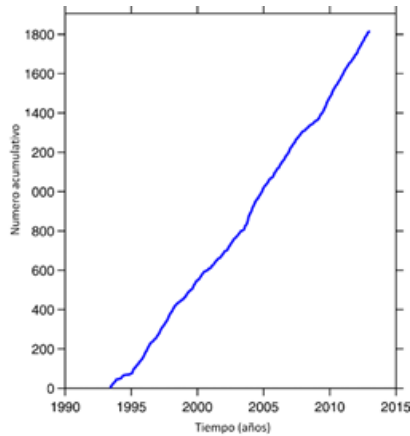


Figura 8. Distribución acumulativa de eventos sísmicos contenidos en el catálogo.

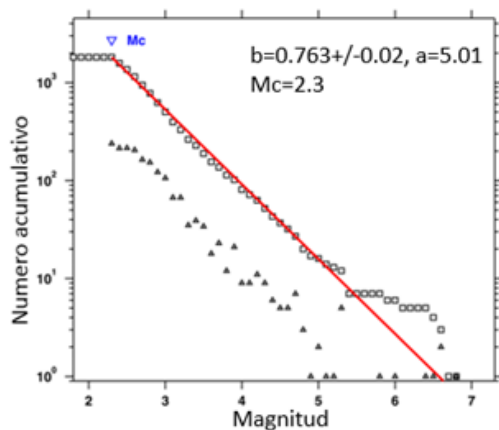


Figura 9. Distribución de la relación frecuencia-magnitud.

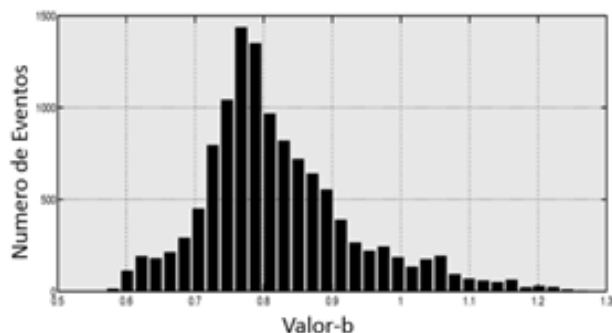


Figura 10. Histograma de los valores del valor de b observados en cada nodo de la malla para toda el área de estudio.

Esta variación es similar a otras zonas de subducción en el mundo, como la encontrada en México, donde los valores de b están en el rango de 0.5-1.5 (Zuñiga y Wiss, 2001); la encontrada en Centroamérica con valores correspondientes de 0.6-1.6 (Monterroso y Kulháněk, 2003); y similarmente en Perú con valores correspondientes de 0.5-1.2 (Heras y Tavera, 2002; Condori y Tavera, 2010). La distribución espacial de b ha permitido caracterizar y localizar geográficamente la presencia de áreas con alta concentración de energía elástica que podría estar asociada a la deformación interna de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción (áreas de color rojo, Figura 11a). Estas áreas representarían posibles fuentes de futuros sismos a ocurrir con magnitudes superiores a 6.5MI.

De acuerdo con la Figura 11a las áreas significativamente anómalas con valores bajos del parámetro b se ubican en el borde o margen oriental de la región del valle del Cauca, cubriendo los departamentos de Tolima, Quindío y Risaralda. Hacia el lado oeste del valle del Cauca se observan pequeños segmentos con valores bajos de b en el departamento de Chocó. Asimismo, se observa que los epicentros de los principales sismos de magnitud $M \geq 6.5$ MI se encuentran ubicados dentro de las regiones denominadas anómalas o áreas con valores bajos de b , donde hay mayor nivel de acumulación de esfuerzos y deformación, y la probabilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud. La Figura 11b muestra el mapa de periodos de retorno local para sismos con magnitud $M \geq 6.5$ MI, que presentan periodos de retorno de 20 a 40 años para la región del valle de Cauca.

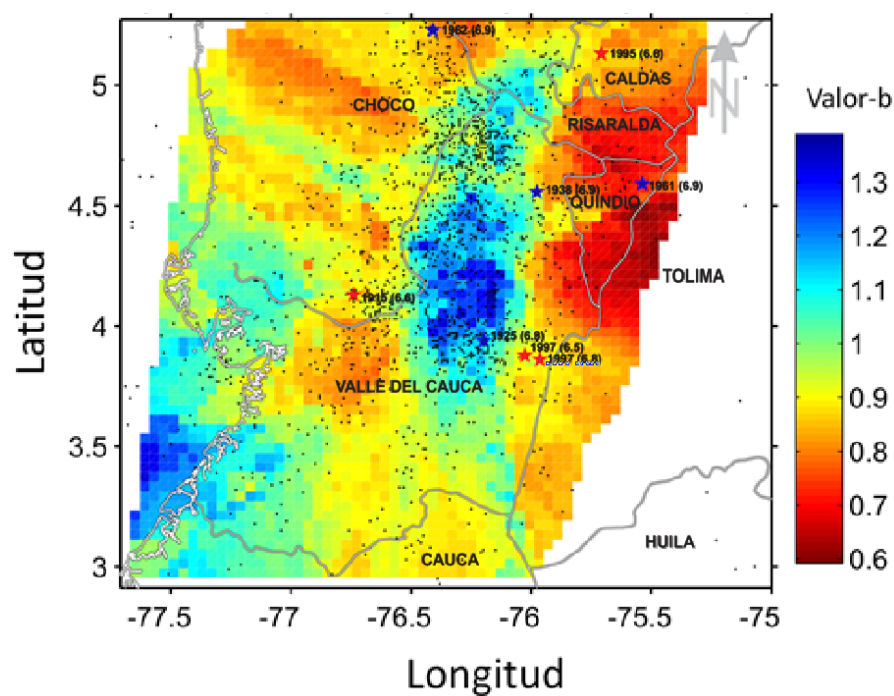


Figura 11a. Mapa de distribución espacial de los valores del valor de b para sismos con foco intermedio en la región del valle del Cauca. Los puntos negros corresponden a eventos sísmicos.

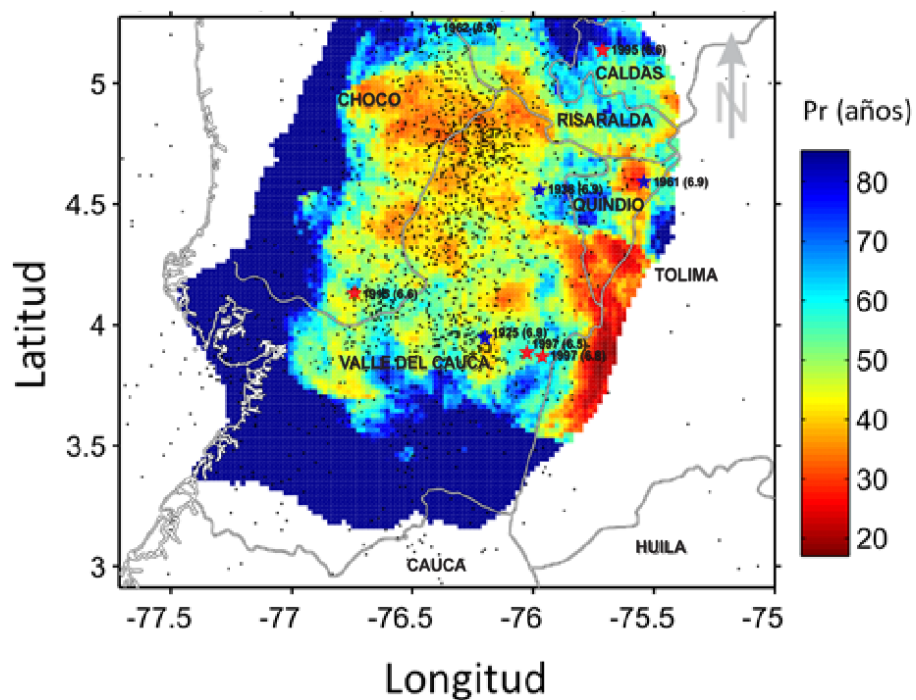


Figura 11b. Mapa de periodos de retorno local para sismos con $M \geq 6.5$ MI.

Para analizar la distribución del valor de b en función de la profundidad (enfoque unidimensional), se realizaron dos perfiles

sísmicos AA' y BB' orientados en dirección NO-SE como se muestra en la Figura 12 (ver Anexo 2).

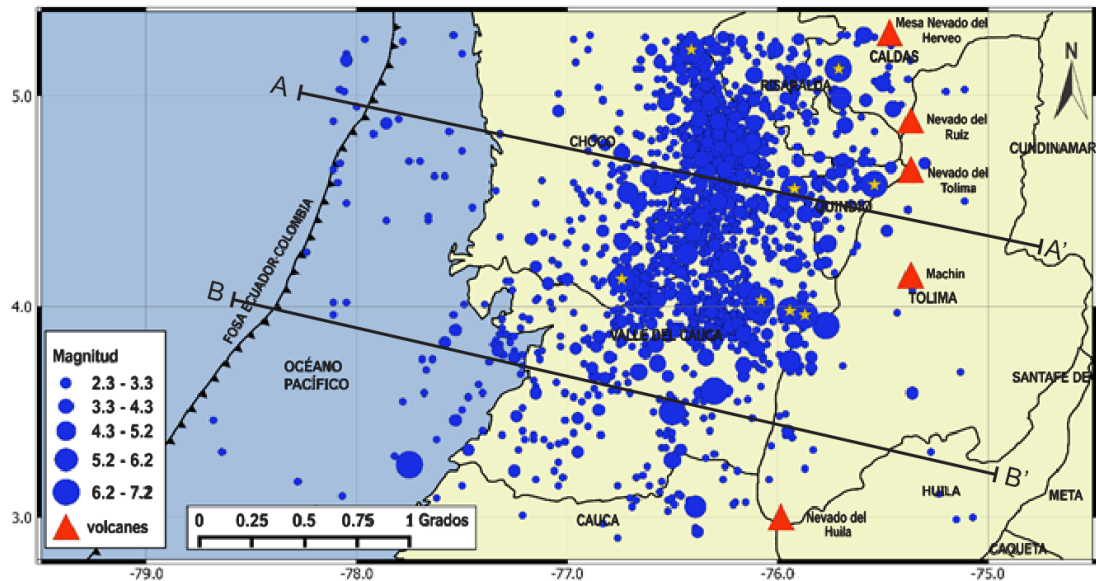


Figura 12. Distribución de la sismicidad con foco intermedio para el periodo 1993-2013. Las estrellas de color amarillo indican los principales sismos mayores a 6.5Ml y los triángulos de color rojo los volcanes activos. Las líneas de color negro corresponden a los perfiles AA' y BB'.

Perfil AA'. En el intervalo de 60 a 120 km de profundidad, el valor de b oscila entre 0.7 y 0.9, con un valor pico de 1.2 a los 80 km. Posteriormente, disminuye entre 120 a 170 km de profundidad (Figura 13a) donde el valor de b está entre 0.5 y 0.8. En la Figura 13b, se observa que los valores altos de b (1.1-1.3) están presentes en la parte superior derecha de la litosfera subducida a una profundidad de 70 a 90 km (entre 300 y 350 km de longitud desde la trinchera). En la parte inferior de la placa se presentan valores bajos de b (0.6-0.8), distribuidos en dos partes, primero entre 90 y 150 km de profundidad, a una distancia desde la trinchera de 230 a 290 km, luego desde los 160 a 180 km, a una distancia de 300 km a más de 350 km desde la trinchera.

Perfil BB'. Los valores de b oscilan entre 0.7 y 0.9 de 60 a 120 km de profundidad. Luego, a 130 km se incrementa a 1.2 (valor pico), y posteriormente comienza a disminuir con algunas fluctuaciones hasta los 170 km de profundidad (Figura 14a). En la Figura 14b se observa que los valores altos de b (1.1-1.3) se distribuyen en dos partes. La primera a una profundidad de 60 a 120 km (entre 150 a 240 km desde la trinchera), luego entre 70 y 140 km de profundidad, a una distancia entre 310 y un poco más allá de 400 km desde la trinchera. En tanto, los valores bajos de b (0.6-0.8), se presentan desde la parte central de la placa (entre 60 y 140 km de profundidad) hasta su parte inferior (de 140 a 180 km de profundidad).

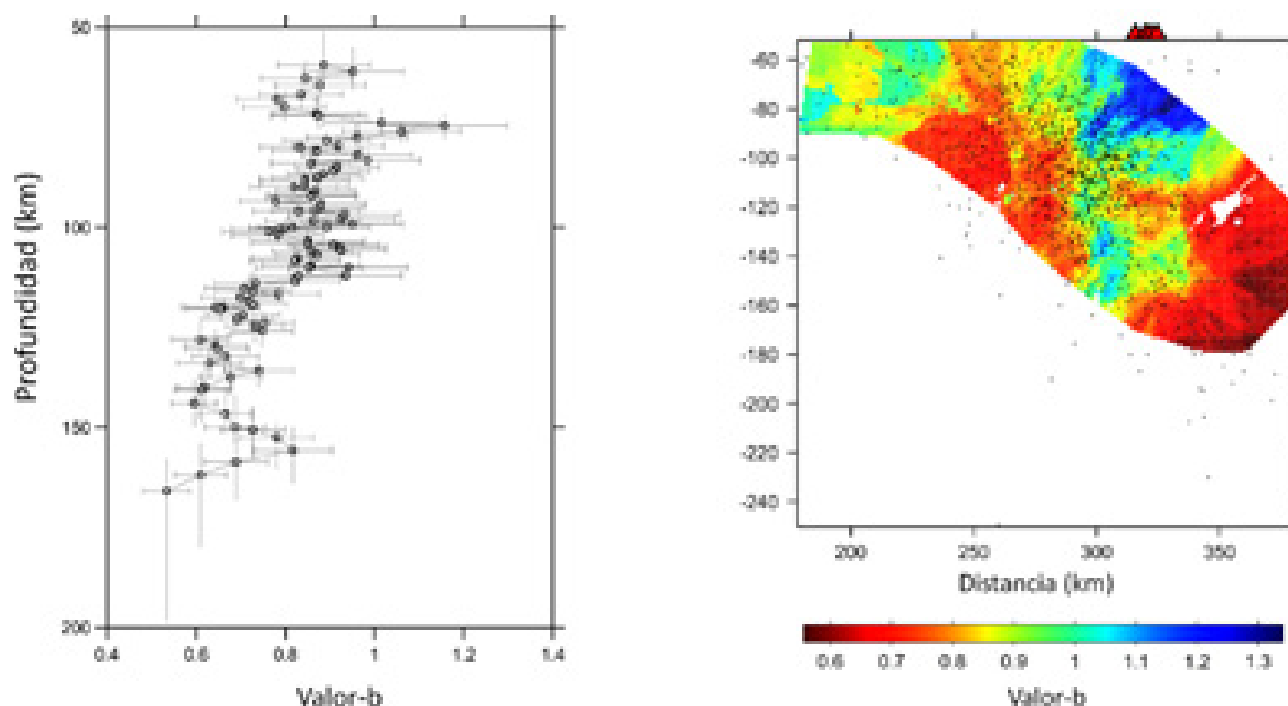


Figura 13. Perfil AA'. a) Variación del valor de b en función de la profundidad; b) tomografía del valor de b a lo largo del perfil. Los triángulos de color rojo representan a los volcanes activos (Machín, Nevado del Tolima, Nevado del Ruiz y Santa Isabel).

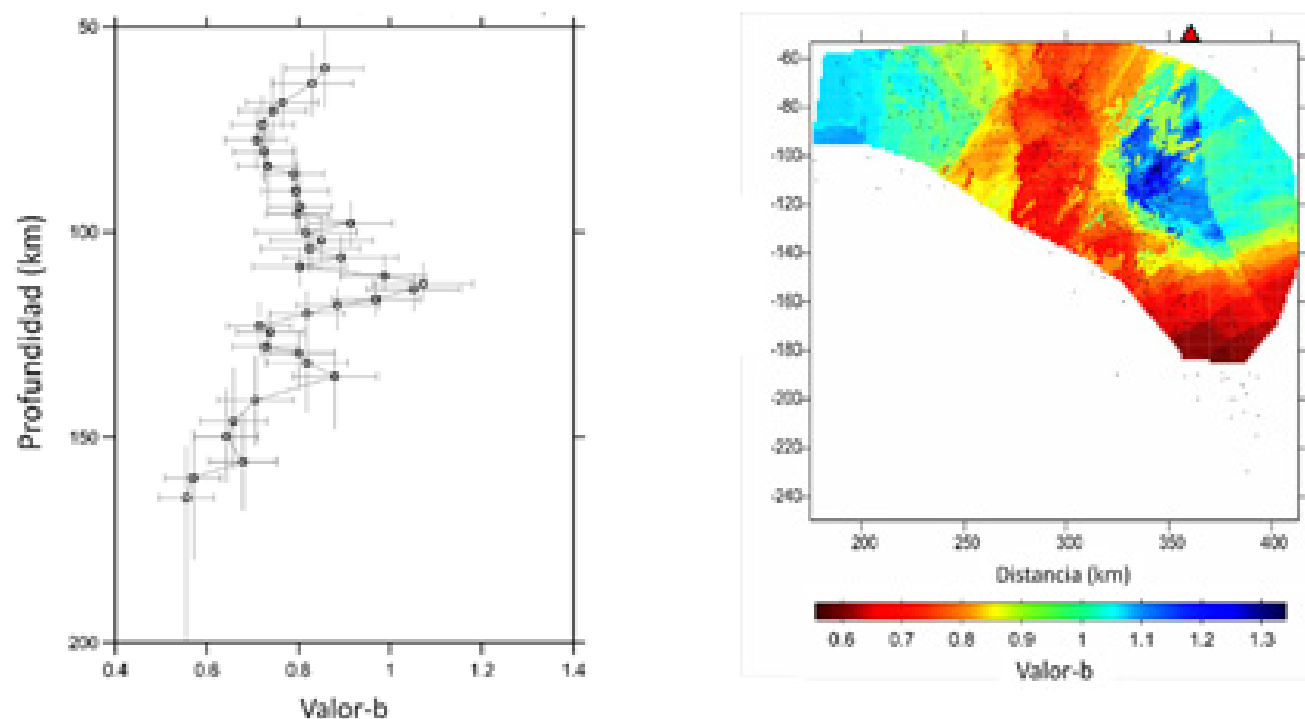


Figura 14. Perfil BB'. a) Variación del valor de b en función de la profundidad; b) tomografía del valor de b a lo largo del perfil. El triángulo de color rojo representa el volcán Nevado del Huila.

Discusión

En las zonas de subducción de Alaska, Nueva Zelanda, Centroamérica y norte de Japón (Wiemer y Beniot, 1996; Wyss et al., 2001) se observó que el incremento de los valores del parámetro b (anomalías) para la sismicidad ocurrida, a una profundidad entre 90 y 100 km, podría deberse al incremento de la deshidratación de la placa que subduce, provocando una disminución de la presión de poro y un aumento de los esfuerzos efectivos. También se ha observado que el valor de b disminuye con el incremento de la profundidad, posiblemente debido al aumento de los esfuerzos diferenciales (Wiemer y Wyss, 1997; Mori y Abercrombie, 1997; Bhattachary y Kayal, 2003; Scholz, 2015).

En la Figura 15 se muestra la comparación entre los perfiles de variación espacial de valores de b en función de la profundidad para sismos intermedios ocurridos en dos diferentes zonas de subducción. La Figura 15a muestra los resultados de la región sísmica de Vrancea situada al este

de los montes Cárpatos, en Rumania (Enescu et al., 2009), que se caracteriza por la alta actividad sísmica a profundidad intermedia (60-170 km) y cuyos valores altos de b se presentan a profundidades que van desde los 90 hasta 125 km. Monterroso y Kulháněk (2003), sugieren que los valores altos de b que varían (anomalías) en el rango de 80 a 100 km de profundidad (Figura 15b) a lo largo de la trinchera mesoamericana, dentro de la zona de subducción de América Central (Guatemala), están relacionados con el proceso de génesis del magma debajo de la cadena volcánica. Este sería un caso similar al encontrado en las zonas aledañas al valle del Cauca, donde hay presencia de actividad volcánica (Nevado del Tolima, Nevado del Ruiz y Santa Isabel) aproximadamente a 300 km desde la trinchera (Figura 6 y 13) y donde se presentan valores altos de b entre 1.1 y 1.3, a una profundidad de 70 a 90 km (Figura 13a, 13b y 15c). De acuerdo con Maden y Ozturk (2015), los valores altos b están asociados a un alto gradiente térmico, cámaras magmáticas o zonas de baja velocidad en la corteza terrestre.

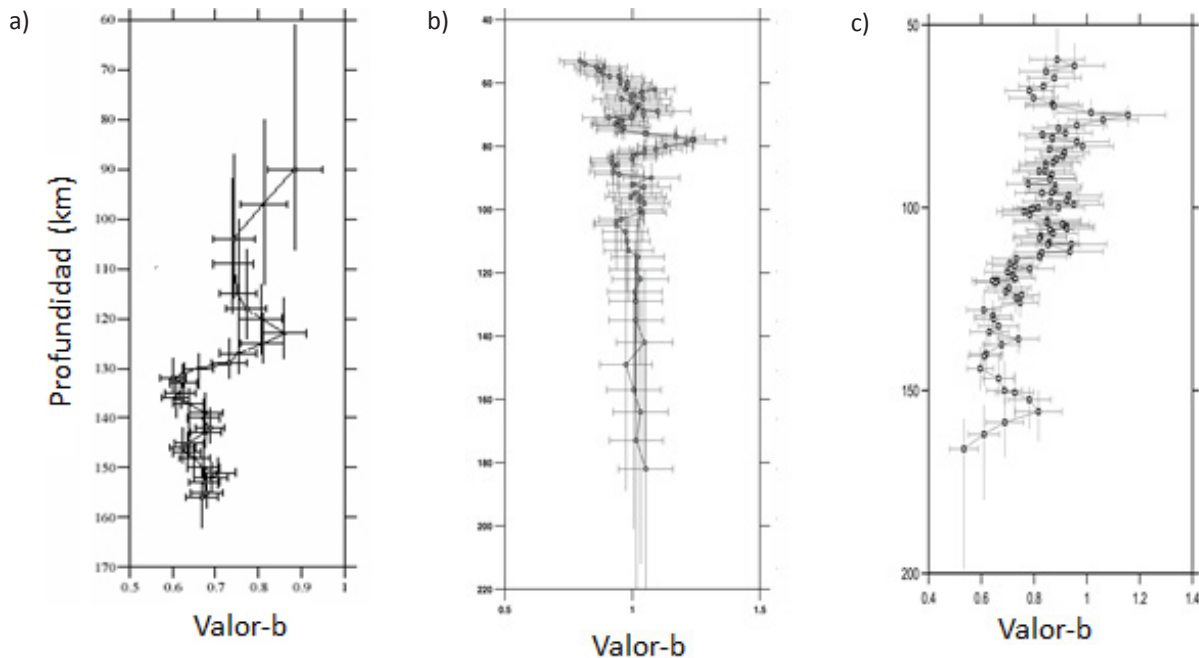


Figura 15. Comparación de la variación espacial de valores de b en función de la profundidad, para sismos intermedios en las regiones de, a) Vrancea (Rumania; Enescu et al., 2009); b) América Central (Guatemala; Monterroso y Kulháněk, 2003); y c) Colombia (valle del Cauca).

Conclusiones

Los valores de variación de b para la región del Valle del Cauca, oscilan entre 0.6 y 1.3. Los periodos de retorno para sismos locales con $M \geq 6.5$ ML, se encuentran entre 20 y 40 años. En este caso es importante hacer la salvedad de que los periodos de recurrencia tienden a ser mayores que el tiempo del catálogo sísmico usado. Por ello se recomienda hacer un próximo trabajo usando un catálogo más robusto para mejorar este tipo de análisis.

Hacia el norte y sur (de acuerdo a los perfiles AA' y BB'), los valores bajos de b (0.6-0.8) distribuidos en la parte inferior de la placa Nazca (~80 km), podrían estar relacionados con la presencia de asperezas o zonas probables de ocurrencia de sismos grandes. Dichos valores comienzan a presentarse desde los 90 km de profundidad en el norte, y a partir de los 60 km de profundidad en el sur, salvo los valores picos de 1.2, a 80 y 130 km de profundidad, que se presentan en el norte y sur, respectivamente. Esta variación en ambos lugares puede relacionarse con los cambios en las propiedades físicas dentro de la placa Nazca.

Por ejemplo, en el norte esta variación de b con la profundidad, puede estar asociada con una alta heterogeneidad y baja resistencia de la corteza. Ello haría posible un fracturamiento alto de la placa, mayor ocurrencia de sismos y la generación de volcanismo debido a posibilidad de que el magma ascienda fácilmente desde el manto hacia la superficie por el medio fracturado. Por el contrario, la variación de b con la profundidad en el sur, posiblemente se relacione con menor deformación y menor fracturamiento, por lo tanto, habría menor ocurrencia de sismos y menor vulcanismo.

Otro aspecto que podría pensarse de acuerdo a la variación del valor b con la profundidad para la parte norte y sur, es el nivel de acoplamiento de la placa Nazca con respecto a la placa

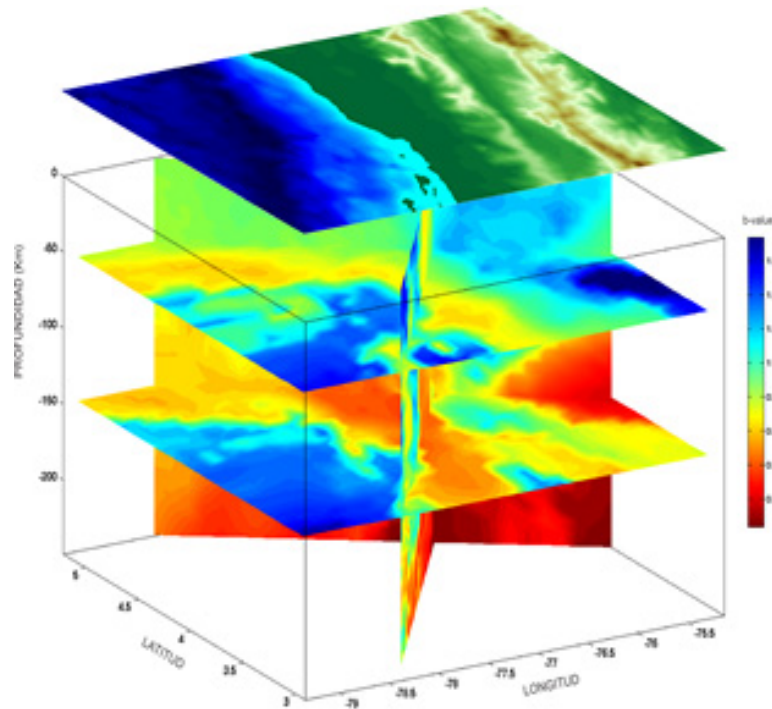
Suramérica en estas zonas. Esta idea se apoya en la hipótesis formulada en recientes trabajos (Nishikawa y Ide, 2014; Ávila-Barrientos, et al., 2015) donde se relacionan los valores bajos de b con el alto acoplamiento de las placas en zonas de subducción, así como a las condiciones térmicas y de edad de la placa. En este sentido, posiblemente en el norte el acoplamiento de la placa Nazca sea menor que en el sur, lo cual estaría relacionado con la actividad sísmica de la región. Por ejemplo, en la zona sur, la poca ocurrencia de sismicidad puede ser debido a la intensa resistencia (fricción) entre las placas, lo que conlleva a la acumulación lenta de esfuerzos y que, una vez se supere dicho nivel de resistencia, se generen sismos de gran magnitud como los ocurridos en septiembre 30 de 2012 con magnitud 7.1 Mw y febrero 9 de 2013 con magnitud 6.9 Mw, ambos localizados al sur de la región del valle del Cauca a profundidades intermedias.

Como se puede apreciar, el estudio de la variación del valor de b con la profundidad en zonas de subducción, muestra que las causas principales de su perturbación pueden ser: el grado de heterogeneidad de los materiales, la deshidratación de la placa, cambios en los niveles de esfuerzos, la alta resistencia reológica, la edad y la temperatura de las placas. Por tanto, el análisis del valor de b ha permitido caracterizar fuentes sismogénicas en varias partes del mundo, y su utilidad en esta investigación ha contribuido al entendimiento de la actividad sísmica en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia.

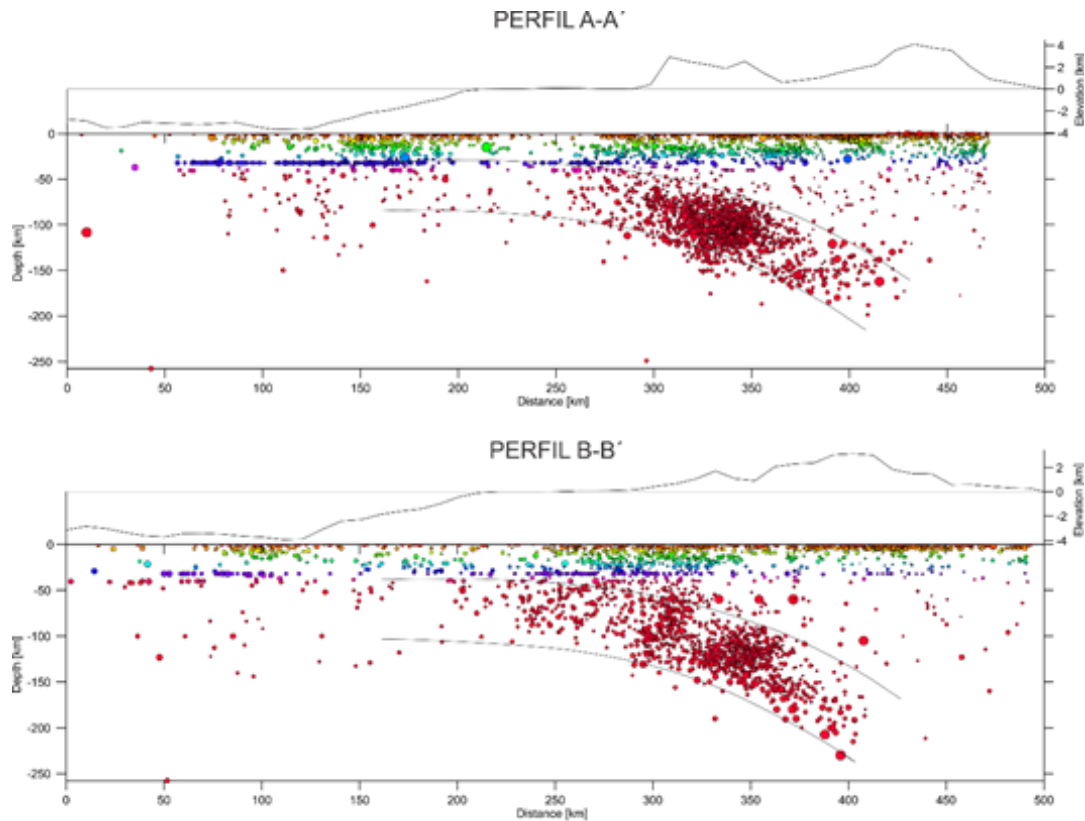
Agradecimientos

A la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), Dr. Hernando Tavera director de la División de Sismología del Instituto Geofísico de Perú (IGP) y Dr. Elkin de Jesús Salcedo director del Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle. Igualmente nuestros sinceros agradecimientos a

ANEXOS



A1. Esquema tridimensional de la distribución de valores de b en la región del Valle del Cauca.



A2. Perfiles de sismicidad estudiados en el la región del Valle del Cauca. Los puntos en color rojo corresponden a los eventos usados para el análisis.

un evaluador anónimo, a la Dra. Gina Villalobos por contribuir en la considerable mejora de este trabajo y al Dr. Luis Delgado Argote por el seguimiento a la evolución del mismo.

Referencias

- Ávila-Barrientos, L., Zúñiga, F.R., Rodríguez-Pérez, Q., Guzmán-Speziale (2015). Variation of b and p values from aftershocks sequences along the Mexican subduction zone and their relation to plate characteristics. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 63, 162-171.
- Arcila M., Dimaté, C. (2005). Caracterización de fuentes sísmicas. En: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6. INGEOMINAS-DAGMA. M. Bogotá. 38p.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 43, 237-239.
- Bhattachary, P., Kayal, J. (2003). Mapping the b values and its correlation with the fractal dimension in the northeast region of India. *Journal of the Geological Society of India*, vol. 62, p.680.
- Condori, C., Tavera, H. (2010). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro “ b ”. Tesis para optar por el título de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas. 130p.
- Condori, C. (2011). Análisis y localización de probables áreas de ruptura por sismos, en el borde occidental del Perú: distribución de valores de “ b ”. *Congreso Peruano de Geología*, No. 9, pp 1193-1195.
- Corredor, F. (2003). Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America. *Tectonophysics* 372, p.147– 166.
- Collot, J. Y., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P., Graindorge, D., Gutscher, M., Spence, G. (2004). Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin. *J. Geophys. Res.*, 109, B11103, doi:10.1029/2004JB003060.
- Enescu, B., Enescu, D., Ito, K. (2009). Values of b and p : Their variations and relation to physical processes for earthquakes in Japan and Romania. *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 56, Nos. 3-4, P. 590-608.
- Freymueller J. T., Kellogg J. N., Vega V. (1993). Plate motions in the North Andean region. *Journal of Geophysical Research*. Published in *Journal of Geophysical Research*, Volume 98, No. B12, p. 21.853-21.863.
- Gerstenberger, M.C., Wiemer, S., Giardini, D. (2001). A systematic test of the hypothesis that the b -value varies with depth in California. *Geophys. Res. Lett.*, 28(1), 57-60.
- Gutenberg, R. and Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- Gutscher M. A., Malavieille J., Lallemand S. Collot J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, p.255–270.
- Heras, H., Tavera, H. (2002). Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de periodos de retorno local basado en distribución de valores de “ b ”. *Centro Nacional de Datos Geofísicos, boletín de la S.G.P.* p. 7-16.

- INGEOMINAS (2005). Estudio de Microzonificación Sísmica de Cali. Investigaciones Neotectónicas en el Centro Occidente Colombiano. Informe No. 1-3. Bogotá D.C.171p.
- Kellogg J. N., Dixon T., Neiland, R. (1989). Central and South American GPS Geodesy. EOS Trans., 70, p.649-656.
- Kellogg, J., Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, Geol. Soc. Amer. Special Paper 295, 75-90.
- Kossobokov, V. G., Keilis-Borok, V. I. (2000). Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. Pure Appl. Geo-phys., 157, 11, 2323-2349.
- Lin, Y., Claude, J., Hsu, S. (2008). Variations b-values at the western edge of the Ryukyu Subduction Zone, north-east Taiwan. V. 20 issue 2: pages 150-153.
- López M. C. (2006). Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca, Colombia. Contribuciones Paleosísmicas. Tesis Universidad EAFIT. 102p.
- Malone, S., Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters, Vol. 72, No. 2, pp. 374-383.
- Mogi, K. (1962). Magnitude frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo, vol. 40, p. 831.
- Monsalve, H. (1998). Geometría de la subducción de la Placa Nazca en el noroeste de Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. 107p.
- Monterroso, D.A., Kulhánek, O. (2003). Spatial variations of b-values in the subduction zone of Central America, Geofísica Int., 42(4), 1-13.
- Mori, J., Abercrombie, R. (1997). Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for rupture initiation, J. Geophys. Res., 102, B7, pp. 15081–15090.
- Maden, N; Ozturk, S. (2015). Seismic b-Values, bouguer gravity and heat flow data beneath eastern Anatolia, Turkey: tectonic implications. Springer, 22p. DOI 10.1007/s10712-015-9327-1.
- Nishikawa, T., Ide, S. (2014). Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy. Nature Geosci. 7, 904-908. <http://dx.doi.org/10.1038/NGEO2279>.
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America, J. Geophys. Res. 86; p.10753–10770.
- Pedraza, P. (2006). Geometría de la subducción de la placa Nazca en el suroeste de Colombia, Implicaciones tectónicas y sísmicas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 118p.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. (1986). The standard error of the magnitude-frequency b value. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 72, p. 1677-1687.
- Reasenber, P. (1985). "Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982". Journal Geophysical Research, vol. 90, .o. B7, Pages 5479-5495.
- Salcedo, E. J., Pérez, J.L. (2016). Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos. Boletín de geología, Vol. 39, 27p.

- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., Gorin, G. (2008). Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: Field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia. *Tectonophysics*, Vol. 460, pp. 134-157. doi:10.1016/j.tecto.2008.07.015.
- Scholz, C.H. (1968). The frequency-magnitude relation of micro-fracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 399-415.
- Scholz, C. H. (2015), On the stress dependence of the earthquake b value, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/ 2014GL062863
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, Olaya, J. and Rivera, C. (2000), Geodynamics of the northern Andes; subductions and intracontinental deformation (Colombia), *Tectonics*, 19 (5), 787-813.
- Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T., Mora-Páez, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. South Am. Earth Sci.* No. 15, p.157-171.
- Trenkamp R., Mora-Páez H., Salcedo E. and Kellogg J. N. (2004). Possible rapid strain accumulation rates near Cali, Colombia, determined from GPS measurements (1996-2003). *Earth Sci. Res. J.* Vol. 8, No. 1. p. 25-33.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log N=a-bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 99-103.
- Warren N.W., Latham G.V. (1970). An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4455-4464.
- Wiemer, S., Zuñiga, R. (1994). ZMAP-a software package to analysis seismicity (abstract) *E, OS, Trans.*, AGU, 75, 456.
- Wiemer, S., Benoit, J. (1996). Mapping the b -value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1557-1560.
- Wiemer, S., Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times?. *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.
- Wiemer, S., Wyss, M., (2000). Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 4, 859-869.
- Wiemer, S., Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Journal Article*, p.40.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 31, pp. 341-359.
- Wyss, M., Nagamine, K., Klein, F.W., Wiemer, S. (2001). Evidence for magma at intermediate crustal depth below Kilauea's East Rift, Hawaii, based on anomalously high b -values. *J. Volc. Geoth. Res.* Vol. 106, 23-37.
- Zuñiga, R., Wyss, M. (2001). Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of Mexico, estimate from local recurrence times based on b -values. *Geophys. Jour. Intern.* 90.

Recepción del manuscrito: 26 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 30 marzo de 2016

Aceptación: 15 abril de 2016