



## Comportamiento del parámetro "b" de Gutenberg-Richter en los sismos de la región NOA. Argentina

### Behavior of Gutenberg-Richter "b" parameter in NOA region earthquakes. Argentina

Benitez, Lidia M.<sup>1-2</sup> ✉ - Grimolizzi, Otón Matías<sup>2</sup> - Benitez, Sonia B.<sup>1-2</sup>

Recibido: 12 de Julio de 2012 • Aceptado: 30 de Diciembre de 2012

#### Resumen

*La zona en estudio está ubicada en el Noroeste Argentino entre los paralelos 22° - 28° latitud sur y los meridianos 63° - 68° longitud oeste exhibiendo una gran complejidad en su geodinámica. Los datos empleados provienen del United States Geological Survey - National Earthquake Information Center (USGS), corresponden a registros instrumentales de actividad sísmica, con magnitud mayor que 4, entre el 1 de Agosto de 1927 y el 31 de Marzo de 2012.*

*El número acumulado de eventos sísmicos versus sus correspondientes magnitudes sigue la Ley de potencia de Gutenberg-Richter y se ajusta a una recta cuando se representa en escala semilogarítmica. El valor de la pendiente de ajuste de esta recta se denomina "b" y es propio del proceso sísmico de una determinada área (M. A. Rodríguez Pascua et al, 2000).*

*Se distinguieron tres grupos: eventos superficiales con profundidades  $\leq 70$  km, intermedios entre 100 y 300 km y profundos entre 500 y 600 km. El 85% de los sismos se encuentra entre los 100 y 300 km. Se calculó el valor de "b" para cada uno de los niveles, resultando para los sismos superficiales  $b=0,7736$ , para los sismos intermedios  $b=0,813$  y para los sismos profundos  $b= 0,5364$  con un valor mucho más bajo.*

**Palabras clave:** *sismicidad, parámetro "b", frecuencia.*

#### Abstract

*The region under study is located in North West Argentina, with latitude ranging between -22° and -28° and longitudes ranging between -63° and -68°, exhibiting a great geodynamical complexity. Data were taken from USGS information center and correspond to instrumental records of seismic activity with magnitudes larger than 4, spanning from August 1<sup>st</sup>, 1927 to March 31<sup>st</sup>, 2012. The cumulated number*

1. Cátedra de Matemática, Facultad de Cs. Naturales e Instituto M. Lillo, Universidad Nacional de Tucumán

2. Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial (IRGyST), Facultad de Cs Naturales e Instituto M. Lillo, Universidad Nacional de Tucumán

✉ lidibenitez@hotmail.com

of seismic events versus their corresponding magnitude follows the Gutenberg-Richter power law, fitting to a straight line when plotted in semilogarithmic scale. The straight line slope value is known as “b” parameter and characterizes of the seismic process of the area under study (M. A. Rodríguez Pascua et al, 2000).

Three groups were distinguished according to their depth: shallow events with depths less than 70 km, intermediate events with depths ranging between 100 and 300 km, and deep events ranging between 500 and 600 km. Close to 85% of seismic events were located between 100 and 300 km. The calculated values “b” parameter resulted in 0.7736 for shallow events, in 0.813 for intermediate events and in 0.5364 for deep events, sensitively lower value.

**Keywords:** seismicity, “b” parameter, frequency

## INTRODUCCIÓN

Los parámetros clásicos de la sismicidad, tasa de actividad y parámetro “b” de la Ley de Gutenberg-Richter, magnitud máxima, mecanismos focales y fallas activas, han permitido realizar diversas caracterizaciones de esta región.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la actividad sísmica por profundidades en base al análisis del parámetro “b”.

El contraste entre los parámetros “b” a distintas profundidades permite distinguir mejor el fenómeno sísmico de la región en estudio a lo largo del tiempo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se evalúa la sismicidad desde la ubicación de los hipocentros, mediante un cluster de profundidades a fin de obtener

los límites para los sismos superficiales, intermedios y profundos. Se formaron tres dendogramas a una distancia Euclídea de 0,90, uno para sismos con profundidades menores o iguales a 70 km, denotándolos como superficiales, siguiendo el criterio de los cinco perfiles sismotectónicos del Noroeste Argentino identificados en Tesis Doctoral (Suayter 1983). También en la serie de perfiles sismotectónicos realizados en el Salar de Pipanaco en Tesis de Licenciatura (Zossi, 1979). El otro estrato abarca las profundidades entre 100 y 300 km (intermedios) siendo el grupo más numeroso y puede distinguirse un último estrato entre 500 y 600 km, que comprende los sismos más profundos. La Figura 1 presenta el área de estudio mostrando la sismicidad en planta donde se distinguen los tres tipos de sismicidad abordados en el trabajo.

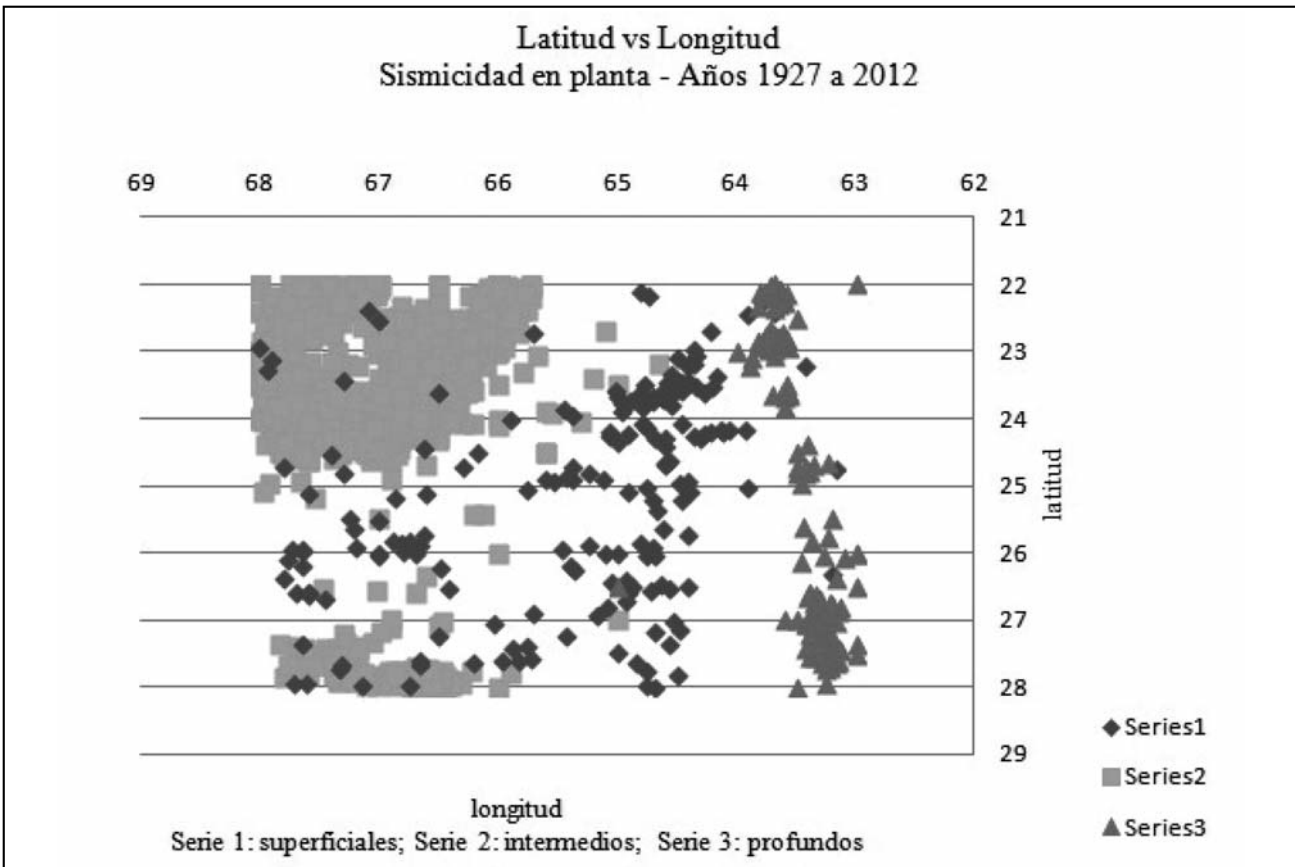


Figura 1. Gráfico Latitud vs Longitud sismos región NOA, años 1927 – 2012, se distinguen los sismos en profundidad (superficiales, Intermedios y profundos)

Los datos incluyen registros, cálculos de fecha, hora, latitud, longitud, profundidad, identificación de la fuente, magnitudes y su descripción (de cuerpo, de superficie, etc., siendo la mayoría de cuerpo).

Se tomó la sismicidad incluida en los catálogos globales por adoptar un criterio internacional, con el entendimiento de que la información consultada incluye datos de calidad de todas las redes locales. A mayor número de redes locales más datos, pero la característica del agrupamiento de los sismos en la región intermedia se seguirá manteniendo.

Los errores de latitud, longitud y profundidad son inherentes a la base de datos empleada. Sin embargo es posible referirse a la base de datos actual NAD83 empleando los algoritmos de conversión publicados en diversos sitios en internet (ej. [www.ap-salin.com/nad-conversion.aspx](http://www.ap-salin.com/nad-conversion.aspx)). Así por ejemplo para el sismo 24,70 latitud sud y 66,30 longitud oeste tomado de la base NAD27 corresponde 24,70004469 latitud sud y 66,2989782 longitud oeste que no afectan los criterios adoptados de separación de sismos por lo pequeño de sus diferencias en magnitud comparado con el tamaño de la región en estudio y las profundidades en decenas y centenas de kilómetros adoptadas para los límites en clasificación de sismos no afectan tal clasificación.

Se analizaron 2461 sismos, de los cuales 2431 (98%) están comprendidos en algunos de los tres grupos, 178 superficiales, 2095 intermedios y 158 profundos. El 85% de los considerados tiene su hipocentro entre los 100 y 300 km de profundidad, es decir que la sismicidad es intermedia en esta región. A lo largo de 85 años los sismos siguen ocurriendo en esa misma franja (entre los 100 y 300 km) y se encuentran al noroeste de la zona de estudio entre los 66° y 68° de longitud oeste y los 22° y 25° grados de latitud sur. Un grupo menor ocurrió entre los 27,5° y 28° de latitud sur. Son considerados sismos interplacas, contenidos en lo que se denomina plano de "Wadatti-Benioff" o zona de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, que es donde se origina el 85% de la sismicidad de la zona. Los epicentros se encuentran en su mayoría, en la Cordillera Oriental; que corresponde al extremo austral de la larga faja andina que comprende la Cordillera Oriental del Perú y las Cordilleras Oriental y Central de Bolivia. La comarca se conoce con el nombre de Andes de Salta y Jujuy. Todos los sismos profundos, es decir un 6,24% del total, se ubicaron en la franja de longitudes comprendida entre los 63° O y 64° O.

El parámetro "b" puede tomar diversos valores, oscilando dentro del intervalo 0,5-1,5 (Aki, 1981) aunque otros autores lo restringen algo más: 0,6-1,3 (King, 1983), siendo 1,1 para la sismicidad mundial. También se sugirió que el valor de "b" representa un índice de complejidad estructural, directamente relacionado con la geometría de la fracturación y la dimensión fractal de la distribución epicentral (Muñoz-Martín et al., 2000).

Teniendo en cuenta la profundidad, se calculó el valor de "b" para cada uno de los niveles por separado con sus respectivos Errores Estándar (EE), dando como resultado para los sismos superficiales  $b=0,7736$  con  $EE=0,02$ , para los sismos intermedios  $b=0,813$  con  $EE=0,01$  y para los sismos profundos  $b=0,5364$  con  $EE=0,01$  un valor mucho más bajo. El valor promedio de "b" obtenido para todas las profundidades en conjunto fue de 0,7076.

Se analizó también el comportamiento del parámetro "b" cada 20 años dentro de cada nivel de profundidad, obteniéndose valores similares a los mencionados, con un rasgo llamativo en lo que corresponde a la franja de los años 1950-1970

presentando en todos los niveles de profundidad una disminución en los valores de b, para los intermedios alrededor de un 40%, para los superficiales y profundos un 22%. Este descenso en la pendiente de la recta es consecuencia del cambio de comportamiento en la actividad sísmica y se refleja en variaciones temporales de "b". Estos valores también se pueden explicar por una falta de registro en los sismos de magnitudes bajas.

Dos modelos son propuestos para explicar la distribución de frecuencia-magnitud. El primer modelo (e.g. Aki, 1984; Wesnousky, 1994; Zúñiga et al., 2009) considera que algunas fallas tienen asociada una ocurrencia preferencial de eventos de ciertas dimensiones, sismos de recurrencia característicos, es decir, que la relación Gutenberg-Richter no se cumple en todo el rango de magnitudes, rompiendo con la autosimilaridad para las magnitudes consideradas. El segundo modelo (e.g. Kagan, 1993; Wesnousky, 1994; Turcotte, 1997) considera que hay una distribución en ley de potencias de la relación frecuencia-magnitud (Ecuación 1). Los sismos superficiales de la zona en estudio se comportan siguiendo este modelo (Figura 2), donde la universalidad de la relación Gutenberg-Richter implica un comportamiento fractal de sismicidad, entendido esto como, cuando una estructura o un fenómeno se repite (de manera exacta o aproximada) a diferentes escalas espaciales y/o temporales, se dice que dicha estructura o fenómeno exhibe un comportamiento fractal y así puede ser asociado con un comportamiento caótico y de auto organización crítica (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000). En la Figura 2 se observa un muy buen ajuste de los puntos a una recta, cumpliéndose la ley de Gutenberg-Richter.

Un ejemplo del primer modelo es el comportamiento de los sismos profundos, zona sismogénica correspondiente a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana en la zona de Benioff (500 a 600 km), donde la auto similaridad (línea recta de la relación Gutenberg-Richter) no se cumple para los valores de magnitudes más grandes (Figura 3). Si bien es cierto el valor de  $R^2$  es alto sólo hay un buen ajuste hasta magnitudes de 6,50 aproximadamente.

Los sismos intermedios siguen también el segundo modelo ajustándose a la relación Gutenberg-Richter y corresponde a los sismos de subducción de la zona de Benioff (100 a 300 km) (Figura 4). Se observa un ajuste casi perfecto de los puntos a una recta con un  $R^2$  de 0,99.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La sismicidad es un proceso estocástico que responde a un modelo de distribución temporal de magnitudes de tipo fractal. Dicha estructura fractal está relacionada directamente con el parámetro "b" (ley Gutenberg-Richter, 1956), a partir de una ley de potencia (Hirata, 1989).

Mediante análisis estadísticos sobre la distribución de la frecuencia acumulada del tamaño de los terremotos Ishimoto e Ida (1939) y Gutenberg y Richter (1944) en forma independiente, establecieron la siguiente ley empírica entre la magnitud de un terremoto y su frecuencia:

$$\log N(m) = a - bm \quad (1)$$

con a y b constantes positiva y N(m) es el número acumulado de eventos en una región y ventana de tiempo específicos, con magnitudes mayores o iguales a m. El valor de "b" varía de región en región (e.g. Kossobokov y Keilis-Borok, 2000), su valor

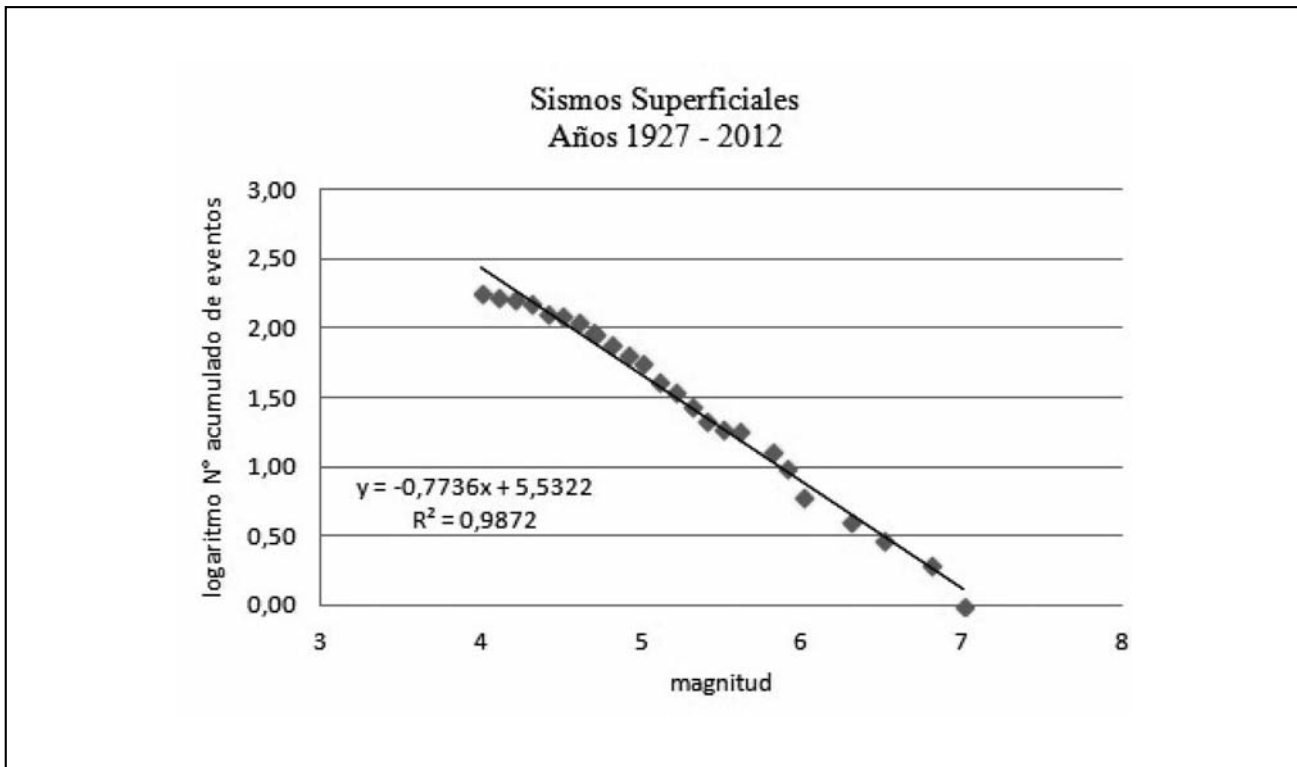


Figura 2. Análisis de la relación Gutenberg-Richter para sismos superficiales Región NOA. La pendiente de la recta Gutenberg-Richter muestra un ajuste que indica una autosimilitud como lo propone el segundo modelo

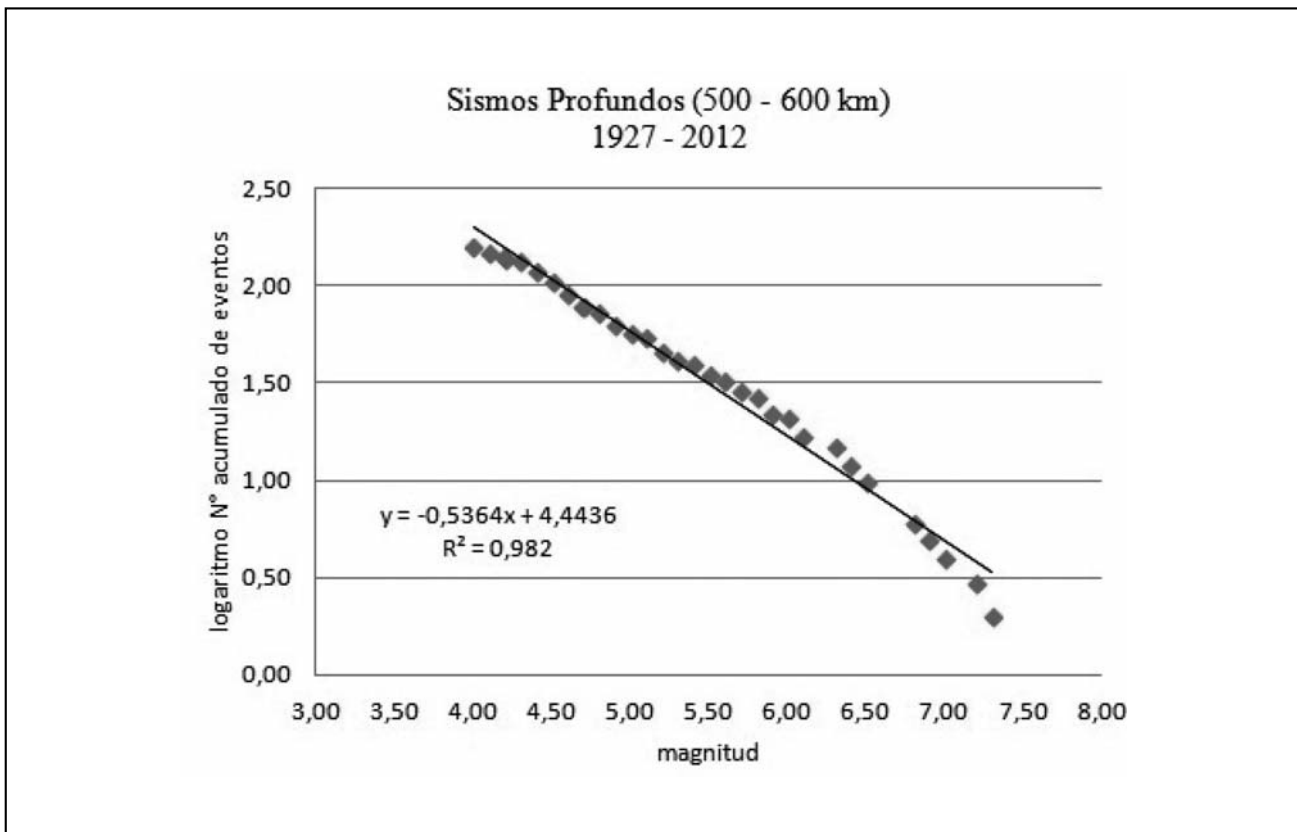


Figura 3. Relación Gutenberg-Richter para la Región NOA, sismos profundos. Se observa la desviación de la auto similitud para eventos de magnitudes desde 6,8 a 7,3, lo que nos indicaría áreas con preferencia a la ruptura como el primer modelo.

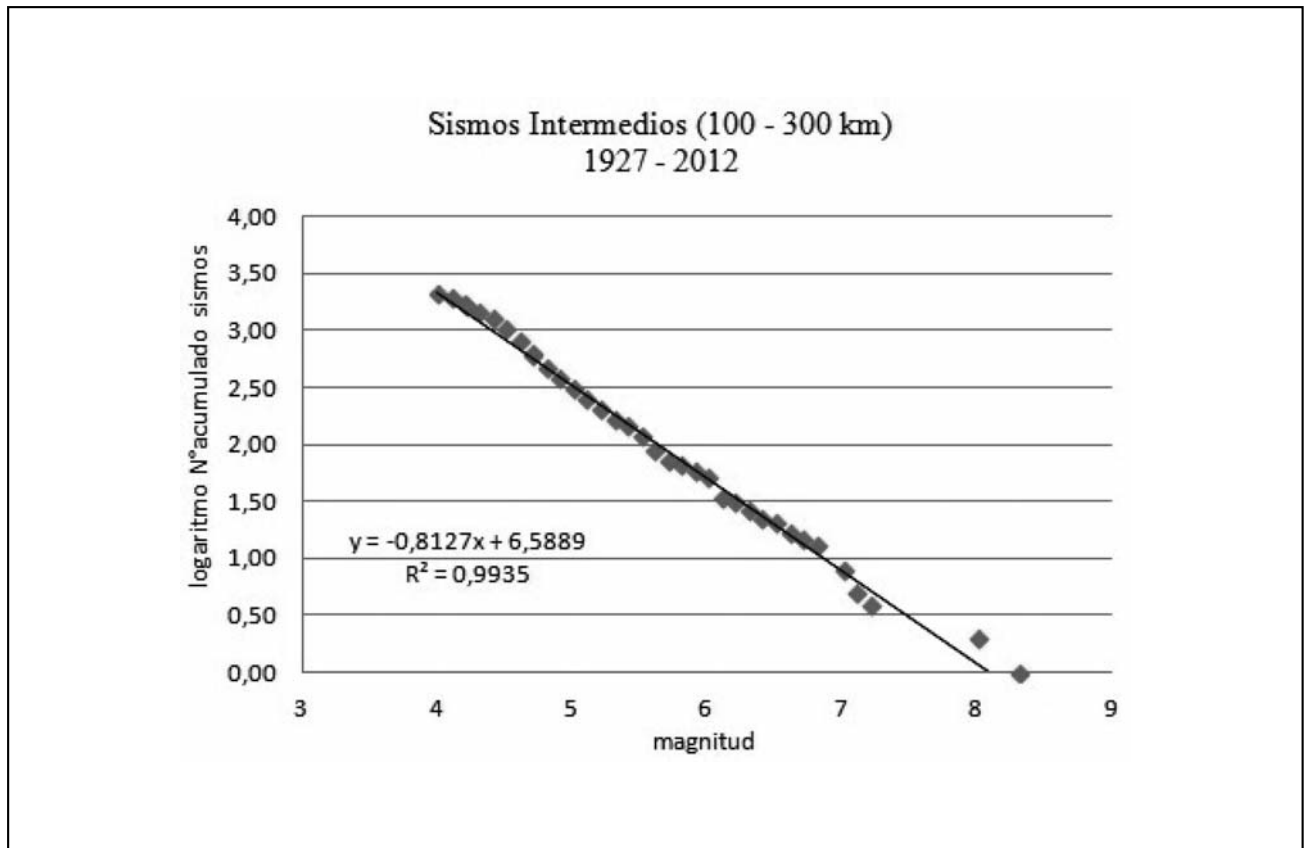


Figura 4. Análisis de la relación Gutenberg-Richter para sismos intermedios Región NOA. La pendiente de la recta GR muestra un ajuste que indica una autosimilitud como lo propone el segundo modelo.

típico es cercano a 1 y es un parámetro tectónico que describe la abundancia relativa de sismos grandes respecto de los pequeños, es decir que representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona. De alguna manera caracteriza al medio sísmico, representando condiciones de la tensión y/o del material en la región focal.

El parámetro "b" también ha sido considerado como una medida del esfuerzo promedio en la región considerada (Wiemer y Wyss, 2002). Se ha observado en el laboratorio que tiene una fuerte relación con el esfuerzo en el volumen a considerar (Scholz, 1968). Hay una relación inversa entre el valor de "b" y el nivel de esfuerzo, dado que un menor valor de "b" implica una menor pendiente en la relación Gutenberg-Richter, que a su vez estaría relacionado con un número mayor de eventos de magnitudes grandes con relación a la cantidad de eventos menores. Esto implica una concentración de esfuerzos mayor en la zona; de la misma forma valores de b grandes implican una concentración de esfuerzo menor (e.g. Zúñiga y Wyss, 2001; Wiemer y Wyss 1997, 2002).

El valor a es una medida del nivel de sismicidad regional o productividad sísmica (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000); matemáticamente expresa el logaritmo del número de sismos con magnitud mayor que cero, es decir, el total esperado de eventos en la región si se extrapola la relación hasta las magnitudes más pequeñas. La validez de esta relación está vinculada

con un escalamiento fractal entre el número de sismos mayor a determinada magnitud y las áreas de ruptura de los mismos determinada a través de la magnitud de momento sísmico (Tesis Figueroa Soto, México 2009). Si esto es así, la ley de escalamiento Gutenberg-Richter está relacionada mediante una ley de potencias con el área de ruptura (Turcotte, 1997; Shcherbakov et al., 2005) de la forma expresada por la ecuación:

$$N(\geq A) \propto A^{(-D/2)} \quad (2)$$

donde  $N(\geq A)$  es el número de eventos con área de ruptura mayor o igual a A y D es la dimensión fractal expresada por  $D = 2b$  para sismos de magnitud intermedia, o como  $D = b$  para eventos grandes (Legrand, 2002).

La dimensión fractal D se puede entender como un indicador de la autosemejanza geométrica.

Los valores calculados están entre 0,5 y 1, en acuerdo con el modelo de líneas de falla conformando un plano o modelo de Goishi (Otsuka, 1972) y con el modelo de ramificación de Vere-Jones (1976). Entonces, suponiendo que el largo total de las ramificaciones sea proporcional a la energía del terremoto, el valor de b según estos modelos sería de 0,75 correspondiendo a una dimensión fractal 1,5.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AKI, K. 1981.  
A probabilistic synthesis of precursory phenomena.  
*In: Earthquake Prediction: An international Review, Maurice Ewing Ser. vol 4, edited by W. Simpsom & P.G. Richards, pp. 566-574. Agu, Washington, D. C.*
- AKI, K. (1984).  
Asperities, Barriers, Characteristic Earthquakes and Strong Motion Prediction.  
*Journal of Geophysical Research. 89. No.B7. 5867-5872.*
- FIGUEROA SOTO, A. (2009).  
Análisis de tiempo interevento en secuencias de réplicas para la identificación de estados de relajación del esfuerzo.  
*Tesis en Sismología Estadística de la Universidad Nacional Autónoma de México.*
- GUTENBERG, B. et al. (1944).  
Frequency of earthquakes in California.  
*Bull. Seismol. Soc. Am. 34: 184-188.*
- GUTENBERG, B. et al. (1956).  
Magnitude and energy of earthquakes.  
*Ann. Geofis., 9:1-15*
- HIRATA, T 1989.  
A correlation between the b value and the fractal dimension of Earth.  
*Jour. Geophys. Res. 94, 36: 7507-7514.*
- ISHIMOTO, M. ET AL. (1939).  
Observations sur les seism enregistres par le microseismograph construit dernièrement (I).  
*Bull. Earthquake Res. Inst. 17: 443-478.*
- KAGAN, Y.Y. (1993).  
Statistics of characteristic earthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 83. No. 1. 7-24.*
- KING, G. 1983.  
The Accommodation of Large Strains in the Upper Lithosphere of the Earth and Other Solids by Self-similar Fault System: the Geometrical Origin of b-Value.  
*Pure App. Geophys. 121: 761-815.*
- KOSSOBOKOV, V.G. ET AL. (2000).  
Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting.  
*Pure and Applied Geophysics, 157. No. 11. 2323-2349.*
- LEGRAND, D. (2002).  
Fractal Dimensions of Small, Intermediate, and Large Earthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 92. 3318-3320.*
- MOGI, K. 1962.  
Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to the earthquake phenomena.  
*Bull. Earthquake Res. Inst. 40: 125-173.*
- OKAL, E. A. et al. (1994).  
On the variation of b-values with earthquake size. Phys.  
*Earth Planet. Interiors 87: 55-76.*
- OTSUKA, M. (1972).  
A chain-reaction type source model as a tool to interpret the magnitude frequency relation of earthquakes,  
*J. Phis. Earth, 20, 35-45*
- RODRÍGUEZ PASCUA M.A. et al. (2000).  
Similitudes entre la actividad sísmica actual y la paleosismicidad.  
*Revista Sociedad Geolog. España, 13(3-4)*
- SHCHERBAKOV, R. et al. (2005).  
Aftershock Statistics.  
*Pure and Applied Geophysics. 162. 1051 – 1076.*
- SCHOLZ, C.H. (1968).  
The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to arthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 58. No.1. 399-416.*
- SUAYTER, L.E. (1983).  
Sismicidad y Tectónica de los Andes del Norte Argentino.  
*Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.*

- TURCOTTE, D.L. (1997).  
Fractal and Chaos in Geology and Geophysics.  
*2nd. Ed. Cambridge University Press.*
- VERE-JONES, D. (1976).  
A. branching model for crack propagation,  
*PAGEOPH*, 114, 711-725.
- WESNOUSKY, S.G. (1994).  
The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, wich is it?.  
*Bulletin of the Seismological Society of America*. 84. No. 6.1940-1959.
- WIEMER, S. ET AL. (1997).  
Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?.  
*Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 102(B7), 15115-15128.
- WIEMER, S. et al. (2002).  
Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes.  
*Advances in Geophysics*. 45. 259-302.
- ZOSSI, M.M. (1979).  
Estudio de la Actividad Sísmica de la Provincia de Tucumán.  
*Tesis de Licenciatura en Física Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*
- ZÚÑIGA, F.R. et al. (2001).  
Most- and Least-Likely Locations of Large to Great Earthquakes along the Pacific Coast of Mexico  
Estimated from Local Recurrence Times Based on b-Values.  
*Bulletin of the Seismological Society of America* 91 No. 6. 1717-1728.
- ZÚÑIGA, F.R. et al. (2009).  
A Seismotectonic Regionalization of Mexico for Engineering Purposes.  
*In process.*