

# DETERMINACIÓN DE LA ESCALA DE MAGNITUD LOCAL ( $M_L$ ) A PARTIR DE REGISTROS DE BANDA ANCHA PARA EL PERÚ

Cristobal Condori y Hernando Tavera

Dirección de Sismología-Instituto Geofísico del Perú. Email: cristobal.condori@igp.gob.pe; hernando.tavera@igp.gob.pe

## RESUMEN

Se ha generado una relación de escala de magnitud  $M_L$  para el Perú basado sobre el análisis de regresión de registros simulados a Wood-Anderson, empleando 742 registros de amplitud medidos en la componente vertical. Para la solución se ha considerado 186 eventos de foco superficiales (0-60 km de profundidad) registrados por 13 estaciones sísmicas de banda ancha de la Red Sísmica Nacional (RSN), periodo 2011-2013. El rango de distancia comprende entre 50 a 1400 km. La corrección por distancia ha sido evaluada en términos del coeficiente de expansión geométrica ( $a$ ), y coeficiente de atenuación inelástica ( $b$ ) siendo de 1.5489 y 0.0009, respectivamente. La nueva escala de magnitud  $M_L$  propuesta para el Perú está definida por  $M_L = \text{Log}_{10} A_{WA} + 1.5489 \text{Log}_{10}(R) + 0.0009(R) - 0.1878$ , donde,  $A_{WA}$  es la amplitud (mm) medido sobre un registro de desplazamiento simulado a Wood-Anderson y  $R$  es la distancia hipocentral en (km). Los resultados estimados para la magnitud  $M_L$  presentan buena correlación con los datos proveídos por el NEIC. Asimismo, el valor de atenuación inelástica es similar al de California para distancias menores a 500 km y comparable con los obtenidos para otras regiones altamente sísmicas.

## INTRODUCCIÓN

El Perú por su ubicación geográfica forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las regiones de mayor potencial sísmico en el mundo; por consiguiente, es frecuente la ocurrencia de sismos de origen interplaca, intraplaca y por deformación cortical, todos producidos por el proceso de subducción entre las placas de Nazca bajo la Sudamericana con una velocidad relativa del orden de 6 a 7 cm/año (DeMets et al., 1990). Por lo tanto, es importante estudiar y estimar con precisión los parámetros hipocentrales al igual que la magnitud de los sismos.

El concepto de escala de magnitud local ( $M_L$ ) fue propuesta originalmente por Richter, (1935) para cuantificar el tamaño de los sismos al sur de California. Esta escala está basada en la amplitud máxima registrada por un sismógrafo de torsión tipo Wood Anderson con un periodo natural de 0.8 segundos, una constante de amortiguamiento de  $h=0.8$  y una magnificación estática de  $V=2800$ . La magnitud ( $M_L$ ) tiene una gran dependencia de la atenuación de la energía, y por tanto depende enormemente del marco tectónico local de la zona de estudio (Kim, 1998; Keir et al., 2006; Saunders et al., 2012, Abdel et al., 2013).

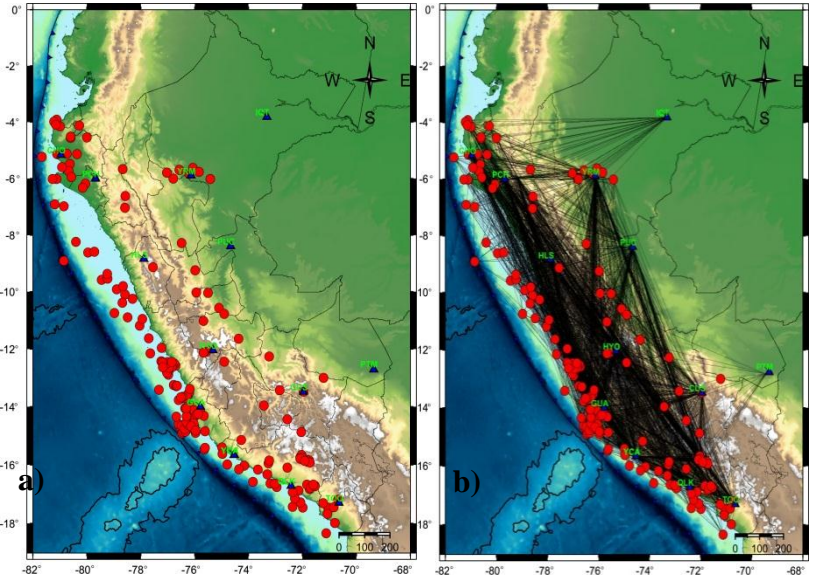
En el Perú, el cálculo de la magnitud ( $M_L$ ) se realizaba con información de la estación sísmica internacional NNA (Ñaña), posteriormente estudios realizados por Brenguier (2001), Ccallo et al., (2007) y Cahuari y Tavera (2007) permitieron el uso de información de un mayor número de estaciones sísmicas, siendo a la actualidad la relación propuesta por Ccallo et al., (2007) la de mayor uso.

El objetivo de este trabajo es contribuir a la definición de una escala de magnitud ( $M_L$ ) a partir de la inversión de la amplitud de los registros digitales de sismos registrados por la Red Sísmica Nacional del IGP durante los años 2011 y 2013. Los resultados contribuirán en el mejoramiento del cálculo de las magnitudes ( $M_L$ ) de los sismos ocurridos en Perú a distancias regionales.

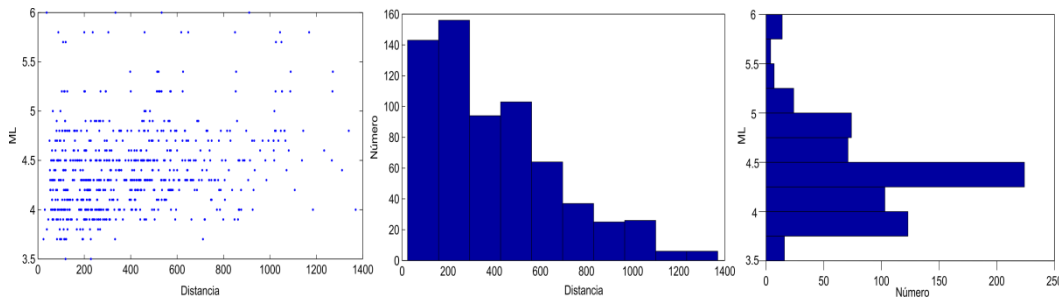
## DATOS

La base de datos utilizado en este estudio comprenden un total de 742 registros de 13 estaciones sísmicas de banda ancha tipo Trillium40 pertenecientes a la RSN y 186 sismos con focos superficiales (0-60 km de profundidad). La distribución espacial de los epicentros utilizados se muestra en la Figura 1a, con distancias epicentro-estación dentro de un rango de 50 a 1400 km (Figura 2). La cobertura de los trazados de rayos entre los eventos y estaciones sísmicas (Figura 1b), es aceptable con respecto a la mayor densidad de observaciones, coincidiendo con la ubicación de las zonas de alta sismicidad en el Perú.

Los valores de amplitudes máximas utilizados en la inversión, fueron leídos en registros de desplazamiento de banda ancha simulados a Wood-Anderson (componente vertical).



**Figura 1:** a) Mapa de eventos sísmicos (círculos de color rojo) (2011-2013) y estaciones sísmicas de banda ancha (triángulos de color azul) de la Red Sísmica Nacional (RSN) del Instituto Geofísico del Perú (IGP), utilizados en el presente estudio. b) Trazado de rayos entre las estaciones sísmicas (triángulos) y los eventos sísmicos (círculos) usados en el análisis de la inversión de amplitudes



**Figura 2.** Magnitud versus distancia epicentro-estación para la data usada en este estudio (izquierdo). Los histogramas de frecuencia en función de la distancia hipocentral (medio) y la magnitud (derecho) indican el máximo de datos utilizados en la inversión.

## METODOLOGÍA

El concepto de la magnitud local ( $M_L$ ) considera un valor de referencia denominado “Magnitud cero” que corresponde a la amplitud máxima de la traza de un sismo equivalente a una micra y corresponde a un sismo de magnitud  $M_L = 3$ . En estas condiciones, la magnitud en la escala de Richter es definida como:

$$M_L = \text{Log}_{10}A(\Delta) - \text{Log}_{10}A_0(\Delta) + S \quad (1)$$

Donde,  $A$  representa la amplitud máxima en el registro del sismo para el cual se desea calcular su magnitud,  $A_0$  es la corrección de distancia determinado empíricamente,  $S$  la corrección de estación y  $\Delta$  la distancia epicentral en kilómetros.

$-\text{Log}_{10}(A_0)$  es el factor de corrección de distancia (Bakun and Joyner, 1984; Hutton and Boore, 1987)

$$\text{Log}_{10}(A_0) = a\text{Log}_{10}(R/100) + b(R - 100) + 3.0 \quad (2)$$

Donde,  $a$  y  $b$  representan los coeficientes de dispersión geométrica y atenuación inelástica dada para una región.  $R$  la distancia hipocentral en kilómetros. El valor de 3 es agregado para mantener la escala y distancia de referencia propuesto por Richter en su definición original. Para establecer una nueva

escala de magnitud  $M_L$ , se procede a unir las ecuaciones (1) y (2) para obtener una función explícita de corrección de distancia apreciada como:

$$\sum_{k=1}^m M_k \delta_{ik} - \sum_{l=1}^n S_l \delta_{ij} - a \log\left(\frac{r_{ij}}{100}\right) - b(r_{ij} - 100) = \log A_{ij} + 3.0 \quad i, k = 1, 2 \dots m; j, l = 1, 2, \dots n \quad (3)$$

Donde  $A_{ij}$  es la amplitud máxima del  $i$ -ésimo evento en el  $j$ -ésimo estación;  $M_k$  es la magnitud del  $k$ -ésimo evento;  $S_l$  es la corrección de estación de  $l$ -ésimo estación,  $r_{ij}$  es la distancia desde el  $i$ -ésimo evento al  $j$ -ésimo estación,  $\delta$  es el delta Kronecker,  $m$  es el número de eventos y  $n$  es el número de estaciones. Los parámetros a ser determinados son  $a$ ,  $b$ ,  $M_k$ , y  $S_l$ , representando los coeficientes de dispersión geométrica, atenuación inelástica, magnitud y corrección de estación respectivamente. La ecuación (3) puede ser representada en forma de matriz (Alsaker et al., 1991; Miao and Langston, 2007) o  $\mathbf{Gu}=\mathbf{d}$ , el cual comprende un sistema de ecuaciones lineales independientes de la forma  $m+n+2$ .

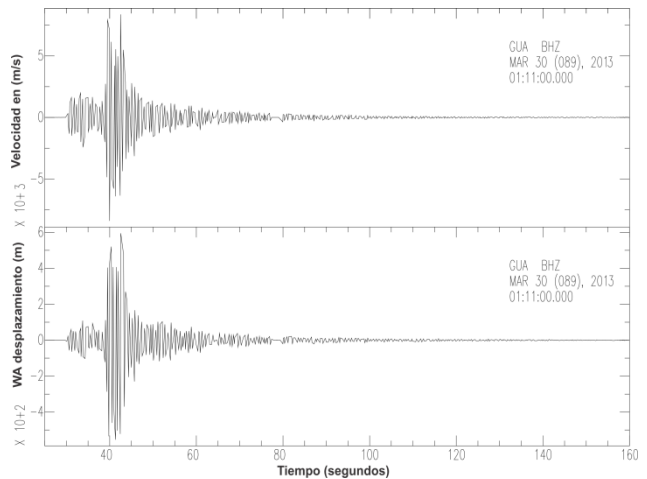
En la ecuación (4),  $p_{ij}=-a \log(r_{ij}/100)$   $q_{ij}=-b(r_{ij}-100)$  y  $y_{ij}=\log A_{ij}+3.0$  son los vectores ( $\mathbf{u}$ ) que deben ser calculados mediante la inversión  $G(G^{-g})$  usando valores singulares de descomposición como los propuestos por Miao y Langston (2007). Estos autores adoptan una metodología de inversión lineal. Para restringir el espacio de soluciones en la inversión, se condiciona que el promedio de las correcciones es igual a cero ( $\sum S_l=0$ ) (Hutton and Boore. 1987).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{11} & q_{11} \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{12} & q_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & p_{1n} & q_{1n} \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{21} & q_{21} \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & p_{22} & q_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & p_{mn} & q_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \\ -a \\ -b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ \vdots \\ Y_{1n} \\ Y_{2n} \\ Y_{22} \\ \vdots \\ Y_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## ANÁLISIS DE DATOS

Para el cálculo de la escala de magnitud  $ML$ , se emplearon registros sísmicos de velocidad en la componente vertical, tal como sugiere Alsaker et al., (1991) y Saunders et al., (2012), en razón que se ha demostrado que el efecto entre las máximas amplitudes medidas sobre las componentes verticales y horizontales son mínimas; por lo tanto, no infiere mucho en los resultados.

El primer procedimiento para simular un registro tipo Wood-Anderson permite remover el ruido de los componentes de DC usando la corrección línea base para toda la data seleccionada. Luego, el espectro de respuesta instrumental fue eliminado por deconvolución, para luego aplicar por convolución el espectro de respuesta de un sismómetro tipo Wood-Anderson. Posteriormente, se procedió a definir las amplitudes del pico máximo y mínimo de la señal sísmica para finalmente, realizar la inversión de las amplitudes. Todo el procedimiento fue transcrito en un script usando los softwares SAC (Seismic Analysis Code) y MatlabR2009a. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del registro simulado a Wood-Anderson (WA), observándose un cambio en las frecuencias con respecto al registro original.



**Figura 3.** Registro de un sismo regional en la estación sísmica de Guadalupe (GUA) (superior) simulado a Wood-Anderson (inferior).

## RESULTADOS

Los coeficientes de la curva de atenuación,  $-\log_{10}A_0$  fueron determinados por el ajuste de mínimos cuadrados mediante una inversión de valores de amplitud de 742 registros simulados a Wood-Anderson correspondientes a 186 eventos registrados por 13 estaciones sísmicas. La primera función de corrección-distancia (curva de atenuación) fue obtenida como:

$$-\log_{10}(A_0) = 1.5489 \log_{10}(R/100) + 0.0009(R - 100) + 3.0 \quad (5)$$

En la Figura 4 se compara la curva de corrección de distancia ( $-\log_{10}A_0$ ) con los correspondientes a otras regiones altamente sísmicas como Australia, Vietnam y California. Observándose que los resultados obtenidos en este estudio sugieren que las características de atenuación en la corteza y el manto superior en el Perú, son similares a las de Australia (Greenhalgh and Sing, 1986), Vietnam (Le Minh et al., 2010) y California (Hutton and Boore, 1987). Finalmente, considerando la curva de atenuación definida (ecuación 5), la nueva escala de magnitud  $M_L$  propuesta en este estudio para el Perú satisface la ecuación:

$$M_L = \log_{10}A_{WA} + 1.5489 \log_{10}(R) + 0.0009(R) - 0.1878 + S \quad (6)$$

Donde,  $A_{WA}$  es la amplitud pico en milímetros medido sobre un registro simulado a Wood-Anderson,  $R$  es la distancia hipocentral y  $S$  es el factor de corrección por estación.

En la Figura 5, se muestra el gráfico de correlación lineal entre las magnitudes  $M_L$  y las magnitudes reportados por el NEIC (mb). A la fecha estos resultados están siendo evaluados; sin embargo, el análisis preliminar indica resultados coherentes con la sismotectónica presente en el Perú.

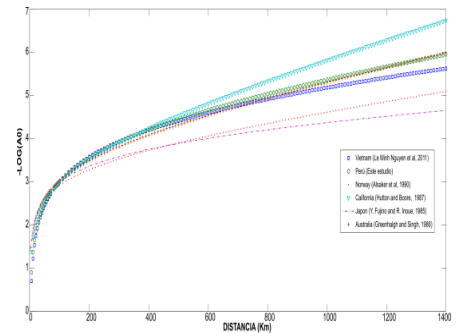
## CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio permiten llegar a las siguientes conclusiones:

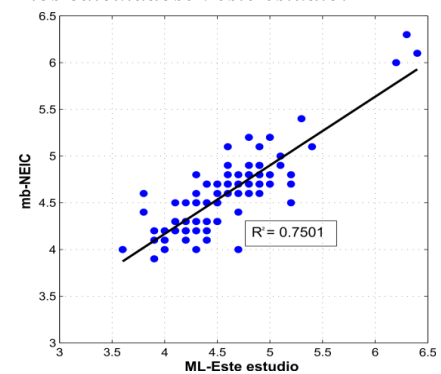
- Una escala de magnitud  $M_L$  basado en la definición de Richter (1935), fue propuesta para el Perú empleando 742 valores de amplitud observados y medidos sobre registros de componente vertical simulado a Wood-Anderson para un rango de distancia de entre 50 a 1400 km.
- Los valores de los coeficientes de atenuación calculados mediante la inversión del ajuste de mínimos cuadrados es: 1.5489 y 0.0009 para  $a$  y  $b$  respectivamente. La curva de atenuación para distancias menores a 500 km obtenida en este estudio, es similar al de California; sin embargo, para distancias mayores a 500 Km, la atenuación del suelo en el Perú es menor.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alsaker, A., Kvamme, L. B., Hansen, R. A., Dahle, A., Bunbum, H. 1991. The ML scale in Norway. Bull. Seism. Soc. Am. Vol 81, No 2, pp 379-389, 1991.
2. Bakun, W. H., Joyner, W. B. 1984. The ML scale in central California. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 74, No 5, pp 1827- 1843, 1984.
3. Brenguier, F., 2001, Calculo de la magnitud local ML para terremotos en Perú (Estación sísmica de NNA). Instituto Geofísico del Perú. V. 2 2001, p. 78-82.
4. Cahuari, A., Tavera, H., 2007, Calculo de la magnitud local (ML) a partir de registros de aceleración: Aplicación a sismos ocurridos en el Perú. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 102: 117-126(2007), ISSN 0079-1091.
5. Ccallo, F., Tavera, H., y Valdivia, I., 2002, La magnitud de sismos locales y regionales ocurridos en Perú a partir de la onda Lg y duración de su registro. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 94(2002) p. 61-69.
6. DeMets, C., Gordon, R., Aarhus, A., Stein, S. 1990. Current plate motions. Geophys. J. Int., 101, 425-478.
7. Greenhalgh, S. A., and R. Singh 1986. A revised magnitude scale for South Australian earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 76, 757-769.



**Figura 4.** Comparación de curvas de atenuación de otras regiones con los calculados en este estudio.



**Figura 5.** Comparación entre las magnitudes del NEIC con los calculados en este estudio.

8. Hutton, L.K. Boore, DM. 1987. The ML scale in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 77, No 6, pp 2074-2094, 1987.
9. Keir, D. Stuart, G.W., Jackson, A. Ayele, A. 2006. Local magnitude scale and seismicity rate for Ethiopian Rift. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96:2221-2230.
10. Kim, W. Y. 1998. The MI scale in eastern North America, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 935-951.
11. Le Minh, Lin T. L., Wu, YM, Huang, B. S., Chang, C. H., Huang, W. G., Le T. S., Dinh, V. T. 2010. The First ML scale for North of Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences* 40(2011) 279-286.
12. Miao, Q., Langston, C.A., 2007. Empirical distance attenuation and the local magnitude scale for the central US. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 2137-2151.
13. Richter, C. F., 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America* 25, 1-31.
14. Saunders, I., Ottemoller, L., Martin B. C. Brandt and Cristoffel J. S. Furie 2012. Calibration of an ML scale for South Africa using tectonic earthquake data recorded by the South African National Seismograph Network: 2006 to 2009, *Journal of Seismology*, ISSN 1383-4649.