

ACTUALIZACIÓN DE LA ESCALA DE MAGNITUD LOCAL (M_L) PARA EL PERÚ, A PARTIR DE REGISTROS DE BANDA ANCHA

Cristobal Condori^{1,2}, Hernando Tavera¹, Giuliano S. Marotta², Marcelo Rocha² y George S. França²

[1] Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida-SCTS, Instituto Geofísico del Perú-IGP. Email: cristobal.condori@igp.gob.pe; hernando.tavera@igp.gob.pe

[2] Observatório Sismológico-OBSIS, Universidade de Brasília-UnB, Instituto de Geosciências-IG. Email: marotta@unb.br; marcelorocha@unb.br; georgesand@unb.br

RESUMEN

Se ha determinado una nueva relación de escala de magnitud M_L para el Perú, en base a la definición original de Richter y usando el análisis de regresión múltiple de registros simulados para 210 eventos con focos superficiales (0-60 km de profundidad) y distancias hipocentrales entre 10 a 1500 km. La relación de atenuación ha sido evaluada en términos del coeficiente de expansión geométrica (a) y coeficiente de atenuación anelástica (b), siendo de 1.5028 ± 0.0716 y 0.0008 ± 0.00001 . La nueva escala de magnitud M_L propuesta para el Perú está definida por $M_L = \log_{10} A_{WA} + 1.5028 \log_{10}(R/100) + 0.0008(R-100) - 3 + S$, donde, A_{WA} es la amplitud (mm) medido sobre un registro de desplazamiento simulado a Wood-Anderson, R es la distancia hipocentral en (km) y S la corrección de estación determinada para cada estación durante la inversión, con los valores entre -0.91 y 0.7. Los resultados para M_L presentan buena correlación con los datos proveídos por las agencias internacionales ISC y el NEIC. Asimismo, el valor de atenuación anelástica es similar al de California para distancias menores a 350 km y comparable con los obtenidos para otras regiones altamente sísmicas.

INTRODUCCIÓN

Por su ubicación geográfica, el Perú 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 con origen en el proceso de subducción 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 entender la cinemática y dinámica del proceso de los terremotos a través de la estimación correcta de la magnitud y sus parámetros hipocentrales. Recientemente, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a través del proyecto Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis (REDSSAT), pone en operatividad un sistema integrado de estaciones sísmicas de banda ancha en todo el territorio nacional, con transmisión por satélite, lo que permitió disponer de información sísmica en tiempo real con mejoras en la cobertura azimutal de estaciones, y reducción de la incertidumbre en la estimación de los parámetros hipocentrales. Por consiguiente, es esencial calibrar una escala de magnitud teniendo en cuenta las condiciones geológicas locales, para el análisis cuantitativo de la sismicidad.

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 (Anderson y Wood, 1925) 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 (Keir et al., 2006; Kim, 1998).

Actualmente en el Perú, no existe un procedimiento óptimo para el cálculo de M_L , pero sí propuestas individuales como la de Brenguier (2001), usando datos de una sola estación, posteriormente por Ccallo y Tavera (2002) y Cahuari y Tavera (2007) con el uso de información de un mayor número de estaciones sísmicas.

El objetivo de este estudio es actualizar y re-calibrar la escala de magnitud M_L , utilizando un mayor número de estaciones sísmicas de banda ancha de la Red Sísmica Nacional (RSN) del IGP (Figura 1a). Los resultados permitirán mejorar la escala de M_L propuesto por Condori y Tavera (2014), para contribuir en el mejoramiento del cálculo de las magnitudes de los sismos ocurridos a distancias regionales.

DATOS

La base de datos utilizado en este estudio comprenden un total de 1384 señales sísmicas para 210 eventos registrados en 35 estaciones de banda ancha tipo Trillium40 y Guralp-40T, pertenecientes a la RSN del IGP (Figura 1a).

La distribución de los epicentros y rango de magnitudes utilizados se muestra en la Figura 1b, todas con distancias epicentro-estación dentro de un rango de 10 a 1500 km (Figura 1c).

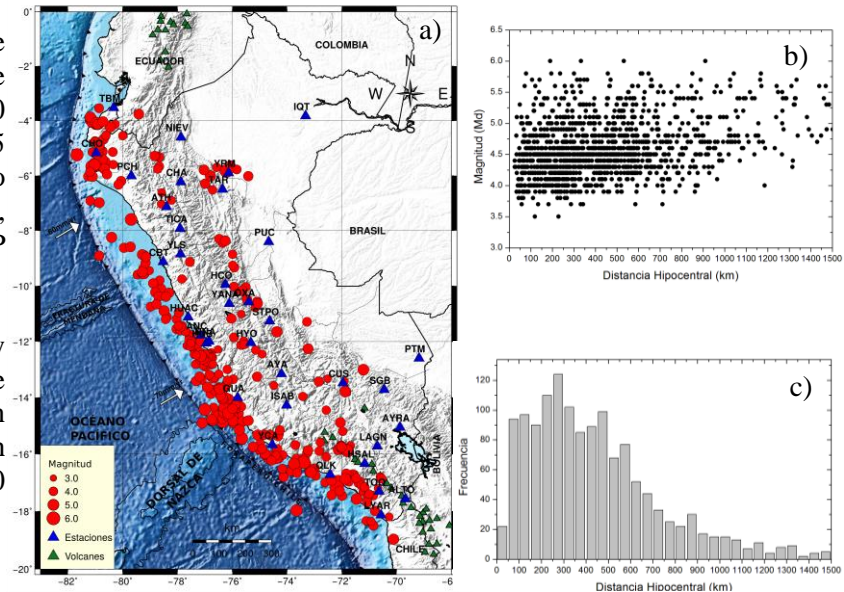


Figura 1. a) Mapa de distribución de estaciones y sismos (2011-2014). b) Distancia Hipocentral vs Magnitud. c) Frecuencia vs Distancia Hipocentral.

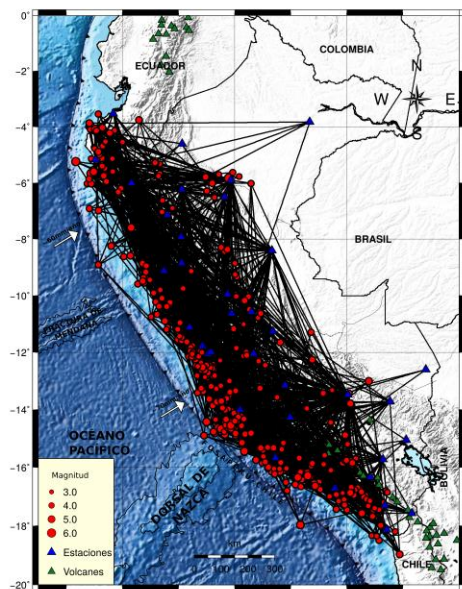


Figura 2. Mapa de trazado de rayos entre los eventos (círculos) y las estaciones (triángulos) usados en la inversión de amplitudes.

La cobertura del hazado de rayos entre los eventos y estaciones sísmicas es aceptable (Figura 2), con respecto a la mayor densidad de observaciones, coincidiendo con la ubicación de las zonas de alta sismicidad en el Perú.

METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS

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 equivalente a un sismo de magnitud $M_L = 3$. En estas condiciones, la magnitud en la escala de Richter es definida como:

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

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 Δ la distancia epicentral en

kilómetros $-\log_{10}(A_0)$ es el factor de corrección de distancia (Bakun y Joyner, 1984; Hutton y Boore, 1987) representado por:

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

Donde, a y b representan los coeficientes de expansión geométrica y atenuación anelástica 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 tal:

$$\sum_{k=1}^m M_k \delta_{ik} - \sum_{l=1}^n S_l \delta_{ij} - a \log_{10} \left(\frac{r_{ij}}{100} \right) - b(r_{ij} - 100) = \log A_{ij} + 3.0 \quad i, k = 1, 2 \dots m; j, l = 1, 2, \dots n \quad (3)$$

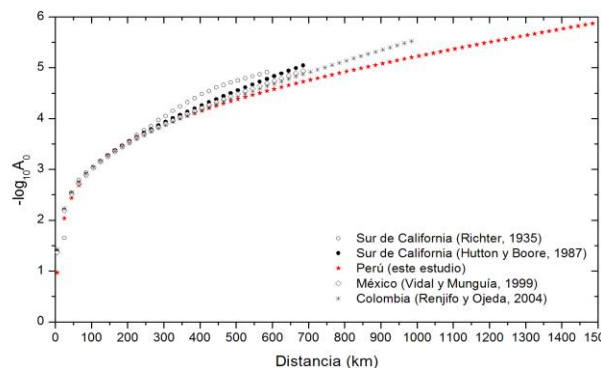
Donde A_{ij} es la amplitud máxima del i-ésimo evento en el j-ésimo estación; M_k es la magnitud del k-ésimo evento; S_l es la corrección de estación de l-ésimo estación, r_{ij} es la distancia desde el i-ésimo evento al j-ésimo estación, δ es el delta Kronecker, m es el número de eventos y n es el número de estaciones. Los parámetros a ser determinados mediante la inversión son a, b, M_k , y S_l , representando los coeficientes de expansión geométrica, atenuación anelástica, magnitud y corrección de estación respectivamente.

Para la determinación de la escala de magnitud M_L , se emplearon registros sísmicos de velocidad en la componente vertical, tal como sugiere Alsaker et al., (1991) y (Saunders et al., (2013), en razón que las máximas amplitudes medidas sobre las componentes verticales y horizontales son mínimas; por lo tanto, no influye 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.

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 los 1384 registros simulados a Wood-Anderson. La primera función de corrección-distancia (curva de atenuación) fue obtenida como:

$$-\log_{10}(A_0) = (1.5028) \log_{10}(R/100) + (0.0008)(R - 100) + 3.0 \quad (4)$$



En la Figura 3 se compara la curva de corrección de distancia ($-\log_{10}A_0$) con los correspondientes a otras regiones altamente sísmicas como México, Colombia y California, observándose que para $\Delta < 350$ km la atenuación son similares; mientras que, para distancias mayores es menor en el caso del Perú. Finalmente, considerando la curva de atenuación definida (ecuación 4), la nueva escala de magnitud M_L propuesta en este estudio para el Perú satisface la ecuación (5).

Figura 3. Comparación de curvas de atenuación.

$$M_L = \log_{10} A_{WA} A_{m,m} + 1, 5028 \log_{10}(R/100) + 0, 0008(R - 100) - 3 \pm S \quad (5)$$

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 4, se muestra el gráfico de correlación lineal entre las magnitudes M_L y las magnitudes reportados por el ISC/NEIC (Mb), siendo estable con un factor de correlación de 0.93.

CONCLUSIONES

Una escala de magnitud M_L basada en la definición de Richter (1935), fue propuesta para el Perú usando 1384 valores de amplitud medidos sobre registros de componente vertical simulados a Wood-Anderson, correspondientes a 210 eventos sísmicos para un rango de distancias entre 10 a 1500 km.

Los valores de los coeficientes de atenuación calculados mediante la inversión del ajuste de mínimos cuadrados es: 1.5028 y 0.0008 para a y b respectivamente. La curva de atenuación para distancias menores a 250 km obtenida en este estudio, es similar al de California; sin embargo, para distancias mayores la atenuación en Perú es menor, esto implica que el uso de la ecuación M_L de California podría causar una sobrestimación del tamaño de la magnitud de los sismos en el Perú.

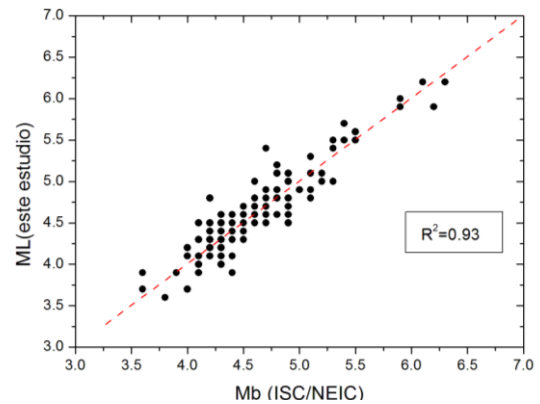


Figura 4. Relación entre M_b (ISC/NEIC) y M_L (este estudio).

BIBLIOGRAFÍA

- Alsaker, A., Kvamm, L.B., Hansen, R.A., Dahle, A., Bungum, H., 1991. The M_L Scale in Norway. *Bulletin of the Seismological Society of America* 81, 379-398.
- Anderson, J.A., Wood, H.O., 1925. Description and theory of the torsion seismometer. *Bulletin of the Seismological Society of America* 15, 1-75.
- Bakun, W.H., Joyner, W.B., 1984. The M_L scale in central California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 74, 1827-1843.
- Brenguier, F., 2001. Calculo de la magnitud local M_L para terremotos en Perú (Estación sísmica de NNA). *Instituto Geofísico del Perú* 2, 79-82.
- Cahuari, A., Tavera, H., 2007. Calculo de la magnitud local (M_L) a partir de registros de aceleración. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 102, 117-126.
- Condori, C., y Tavera, H., 2014. Determinación de la escala de Magnitud Local (M_L) a partir de registros de banda ancha para el Perú. *Resumen XVII Congreso Peruano de Geología, Lima-Perú.*
- Ccallo, F., Tavera, H., 2002. La magnitud de sismos locales y regionales ocurridos en Perú a partir de la onda L_g y duración de su registro. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 04, 61-69.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S., 1990. Current plate motions. *Geophysical Journal International* 101, 425-478.
- Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H., Engdahl, E.R., 2000. Geodynamics of flat subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics* 19, 814-833.
- Hutton, L.K., Boore, D.M., 1987. The M_L scale in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77, 2074-2094.
- Keir, D., Stuart, G.W., Jackson, A., Ayele, A., 2006. Local Earthquake Magnitude Scale and Seismicity Rate for the Ethiopian Rift. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96, 2221-2230. doi:10.1785/0120060051
- Kim, W.-Y., 1998. The M_L scale in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 935-951.
- Richter, C.F., 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America* 25, 1-31.
- Saunders, I., Ottemöller, L., Brandt, M.B.C., Fourie, C.J.S., 2013. Calibration of an M_L scale for South Africa using tectonic earthquake data recorded by the South African National Seismograph Network: 2006 to 2009. *Journal of Seismology* 17, 437-451.