

RECÁLCULO DE LA MAGNITUD DE MOMENTO DEL ENJAMBRE SÍSMICO DE LAGUNILLAS (ESTADO MÉRIDA, VENEZUELA) DEL 2015-2016

ALEJANDRA MARTÍNEZ^{1,2}, HERBERT RENDÓN¹, MICHAEL SCHMITZ^{2,3}, IVETTE BARRIOS^{1,2},
LEONARDO ALVARADO¹

amartinez@funvisis.gob.ve, hrendon@funvisis.gob.ve, mschmitz@funvisis.gob.ve,
ivettebarriosp@gmail.com, alvarado@funvisis.gob.ve

¹Departamento de Sismología, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS, Apartado 76880, El Marqués 1070, Venezuela.

²Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Baruta, 89000, estado Miranda, Venezuela.

³Departamento de Geofísica Aplicada, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS, Apartado 76880, El Marqués 1070, Venezuela.

Recibido: XXX de 2019

Recibido en forma final revisado: XXX de 2019

RESUMEN

Se realizó la determinación del factor de calidad Q para la zona de Lagunillas, estado Mérida, a través del análisis del decaimiento de la coda para 152 eventos con $M_w \geq 3$. Los datos fueron registrados y proporcionados por la Red Sismológica Nacional de FUNVISIS y su procesamiento se realizó con el software SEISAN. Se obtuvieron los valores de $Q_0 = 37,91 \pm 1,23$ y $\alpha = 1,18 \pm 0,05$, parámetros en la expresión $Q_{CODA}(f) = Q_0 f^\alpha$, que permitieron obtener la ley de dependencia frecuencial promedio que se ajusta a la región geográfica donde tuvo lugar el enjambre sísmico de Lagunillas, estado Mérida, durante los años 2015 y 2016. Esta ley se calculó para frecuencias que van de 1,5 a 15 Hz. Posteriormente, se recalculó la magnitud de momento (M_w) de 962 eventos sísmicos correspondientes al enjambre, entre el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo de 2016, para así determinar un valor de magnitud ajustado a las características de atenuación del medio. Esto se realizó a través del análisis del espectro de la onda S y se determinó que la magnitud había sido subestimada por un valor promedio de 0,219. Además, usando el modelo de Brune (1970), se calcularon los parámetros espectrales asociados a cada uno de los eventos y se observó que la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) de la secuencia varía de 0,1 a 100 bar. Se observó un aumento del valor b asociado a la Ley de Gutenberg-Richter, esto podría indicar que FUNVISIS reportó una menor cantidad de sismos pequeños debido a que los parámetros utilizados para el cálculo de M_w no estaban ajustados a las características del medio.

Palabras clave: Magnitud de momento (M_w), Enjambre sísmico, Atenuación, Factor de calidad (Q), Caída de esfuerzo.

MOMENT MAGNITUDE RE-CALCULATION OF THE LAGUNILLA'S SEISMIC SWARM (MÉRIDA, VENEZUELA) OF 2015-2016

ABSTRACT

Quality factor (Q) was determined for the area corresponding to Lagunillas (Mérida, Venezuela) using coda decay analysis for 152 events with $M_w \geq 3$. Data was recorded and provided by FUNVISIS's National Seismological Network and its processing was carried out with SEISAN. $Q_0 = 37.91 \pm 1.23$ and $\alpha = 1.18 \pm 0.05$ were the values obtained after the analysis which correspond to the parameters in the expression $Q_{CODA}(f) = Q_0 f^\alpha$. This equation defines the average frequency dependence law that fits the geographical region where the seismic swarm took place. The expression was evaluated for frequencies ranging from 1.5 to 15 Hz.

Subsequently, the Moment Magnitude (M_w) of 962 seismic events corresponding to the referred seismic swarm was recalculated between November 7, 2015 and March 31, 2016, in order to determine magnitude values that fit the attenuation characteristics of the medium. It was determined, through S wave spectrum analysis, that magnitude values had been underestimated by an average value of 0.219. Furthermore, using the Brune (1970) model, the spectral parameters associated with each event were calculated and the stress drop ($\Delta\sigma$) of the seismic swarm showed a variation going from 0.1 to 100 bar. An increase in the b value associated with the Gutenberg-Richter's Law was observed, this could indicate that FUNVISIS reported a smaller number of small earthquakes because the parameters used for M_w calculation were not adjusted to the characteristics of the medium.

Keywords: Moment magnitude (M_w), Seismic swarm, Attenuation, Quality factor (Q), Stress drop.

INTRODUCCIÓN

Hanks & Kanamori (1979) desarrollaron la escala de magnitud de momento (M_w) con la finalidad de evitar el fenómeno de saturación de magnitud. Esta escala de magnitud es logarítmica, se usa para medir la energía total liberada durante un sismo y está basada en el concepto del momento sísmico (M_0), el cual puede determinarse a partir del espectro de amplitudes para bajas frecuencias o por la observación sobre el terreno del área de la falla y su desplazamiento.

El espectro de desplazamiento en el receptor será modificado por la dispersión geométrica $G(\Delta, h)$ y la atenuación (Havskov, 1989) y, por lo tanto, este no puede ser calculado sin la determinación de estos parámetros. Uno de los parámetros fundamentales para la determinación de la atenuación es el factor de calidad Q (Knopoff, 1964). Este factor expresa el decaimiento de la amplitud de la onda que ocurre cuando una onda se propaga a través de un medio. Aki (1969) desarrolló un modelo para el estudio de este factor a través de la tasa de decaimiento de la coda y sugiere que las codas de un sismo local son ondas de cuerpo retrodispersadas desde diversas y numerosas heterogeneidades distribuidas en la corteza de la Tierra y que podrían ser tratadas a través de métodos estadísticos.

Havskov *et al.* (1989) determinaron el factor de calidad Q para el estado de Washington, Estados Unidos, a través del método de decaimiento de la coda, utilizando el programa CODA Q del software SEISAN y basado en los estudios previos de Aki & Chouet (1975).

En el caso de Venezuela, el primer trabajo del que se tiene referencia sobre el estudio de la atenuación de las ondas sísmicas y el factor de calidad Q es el realizado por García (2004). En este estudio se realizó el cálculo del factor de calidad Q de forma general para toda Venezuela, obteniendo un valor de

$Q_0 = 75 \pm 1,09$ y $\alpha = 0,96 \pm 0,08$, haciendo uso de las ondas coda y el método CODA Q , y donde α es un parámetro el cual ronda los valores entre 0,5 y 1,1 (Singh *et al.*, 1983). Si $\alpha \approx 1$ entonces estaremos en presencia de un medio de alta atenuación. Ambos parámetros pertenecen a la expresión Q_{of}^α , la cual permitirá establecer la ley de dependencia frecuencial promedio que se ajuste a la región estudiada; por lo tanto, α y Q_0 son dependientes de las características tectónicas de la zona (Havskov, 1989).

Por otra parte, existen dos estudios más recientes, el primero realizado por Sorondo (2015) y el segundo por García (2015) en donde se determina el factor Q para occidente y oriente de Venezuela, obteniendo $Q_0 = 61 \pm 23$, $\alpha = 1,11 \pm 0,17$ y $Q_0 = 70 \pm 2$, $\alpha = 0,81 \pm 0,01$, respectivamente. Estos estudios permitieron obtener un valor del factor de calidad Q ajustado a las características de la zona.

Con un factor de calidad Q ajustado a la zona de estudio, se puede obtener un momento sísmico fiable y a su vez una M_w calculada correctamente a través del espectro de amplitudes de la fuente. De forma implícita se obtienen también los parámetros que caracterizan a la fuente sísmica como la caída de esfuerzo, ruptura y frecuencia de esquina. Brune (1970) propone un modelo de falla circular con radio finito el cual permite el cálculo de estos parámetros de la fuente sísmica (o parámetros espectrales) para sismos de tamaño moderado a pequeño. Este modelo de fuente sísmica es el utilizado por defecto por el sistema SEISAN, por lo tanto, se utilizará en el presente trabajo para el cálculo de los parámetros espectrales.

La sismicidad de una zona puede estudiarse de forma estadística a través de un período de tiempo dado y un rango de magnitudes. Para esto se tiene la relación lineal de Gutenberg-Richter (1944), la cual se obtuvo de un estudio de la frecuencia de sismos en California, Estados Unidos. Esta relación ha

resultado valida tanto para una ocurrencia global de sismos como para caracterizar una región específica.

En Venezuela, la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) utiliza la escala de magnitud de momento (M_w) y el cómputo de la misma se realiza a través del software SEISAN (Havskov & Ottemöller, 1999) desarrollado en Noruega. Este software, al ser de origen noruego, asume por defecto leyes de atenuación y valores para el factor de calidad Q ajustados a Europa occidental ($Q_0=400$ y $\alpha=0,7$), los cuales son representativos de las características corticales y la geología de esa zona y, por lo tanto, no se encuentra calibrado para las características del medio venezolano.

A través de 962 eventos sísmicos registrados por la Red Sismológica Nacional se busca validar o, en su defecto, determinar el valor del factor de calidad Q ajustado a las características del medio venezolano, específicamente para la región de Lagunillas, estado Mérida (**Figura 1**).

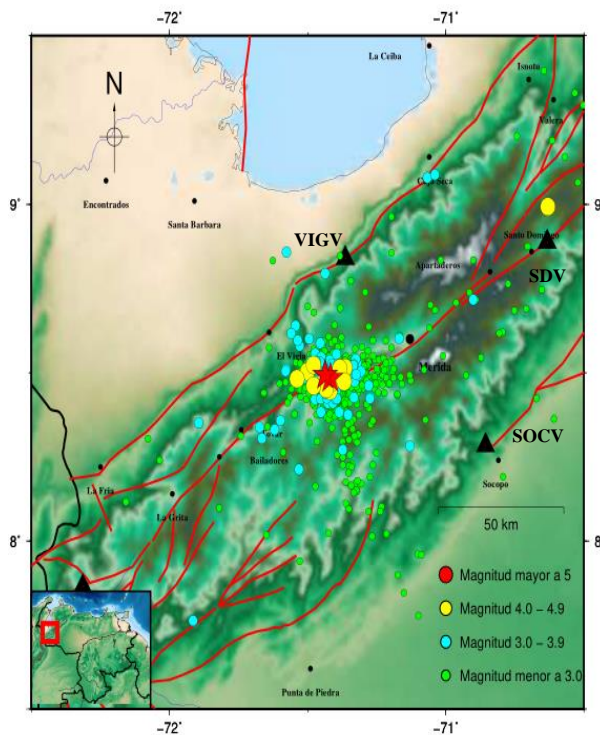


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Se muestran los epicentros de los sismos ocurridos en el lapso desde el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo 2016. Mapa base de fallas cuaternarias de Venezuela según Beltrán –comp.- (1993).

Estos eventos pertenecen al enjambre sísmico que inició el 7 de noviembre en la región de Lagunillas, y la determinación de un factor Q ajustado a la zona

nos permitirá calcular una magnitud de momento (M_w) fiable que pueda develar la naturaleza de esta sismicidad. A su vez, el recálculo de M_w permitirá la obtención de los parámetros espectrales para cada uno de los eventos del enjambre, lo cual llevará a caracterizarla en términos de la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$), momento sísmico (M_0) y ruptura. Por otra parte, calculando las magnitudes correctas del enjambre sísmico, se podrá elaborar la curva de Gutenberg-Richter y obtener la relación lineal con los valores a y b que caracterizan la sismicidad de la zona durante el período de tiempo estudiado. Esto conducirá finalmente a un cálculo adecuado de la amenaza sísmica de la zona de estudio.

MÉTODO

Recopilación y características de los datos

Los datos fueron proporcionados por FUNVISIS (datos sismológicos, curvas de calibración, formas de onda) y fueron seleccionados cumpliendo con el siguiente criterio: **Lapso de tiempo:** Desde el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo de 2016; **Ubicación de los sismos:** Todos los eventos correspondientes a la zona epicentral de Lagunillas; **Latitud:** 7,5° N a 9,5° N; **Longitud:** -72,5° O a -70,5° O; **M_w :** 1,0 a 5,1.

Estos datos, representados en la **Figura 1**, corresponden a un total de 962 eventos sísmicos asociados al enjambre sísmico de Lagunillas, estado Mérida. Esta sismicidad fue registrada por las 38 estaciones Banda Ancha de la Red Sismológica Nacional distribuidas en las zonas de mayor actividad sismológica del país.

Determinación del factor de calidad Q ajustado a la zona de estudio

Para este análisis se redujo el set de datos y solo se trabajó con los correspondientes a los eventos sísmicos con M_w mayor a 3,0, lo cual resulta un buen criterio para garantizar señales con la mejor relación señal-ruido. Esto da un total de 152 eventos para este análisis.

Con el objetivo de obtener un factor de calidad Q ajustado a la zona de estudio, es necesario usar las estaciones más cercanas a la zona epicentral y los datos que presenten la mejor relación señal-ruido. Una mejor relación señal-ruido garantiza una mejor preservación de las propiedades de la señal y por ende de la información asociada al medio por el cual se propaga. Para este estudio se utilizaron las estaciones VIGV (Vigía), SOCV (Socopó) y SDV (Santo Domingo) (**Figura 1**).

Análisis de los datos y ejecución del programa CODA Q

La determinación del factor de calidad Q , se realizará a través de la ejecución del programa CODA Q en el software SEISAN. Los valores de Q para los diferentes pares evento-estación fueron determinados de la siguiente manera: la atenuación de la amplitud causada por atenuación inelástica y dispersión, $A(f,t)$, fue obtenida por un filtro Butterworth pasa banda aplicado a la ventana de la coda, y puede ser descrita a través del factor de calidad Q de la siguiente forma:

$$A(f, t) = A_0 e^{\frac{-\pi f t}{Q(f)}} \quad (1)$$

Donde A_0 es la amplitud inicial, $A(t)$ es la amplitud después de que las ondas han viajado un tiempo t , f es la frecuencia y $Q(f)$ es el factor de calidad dependiente de la frecuencia (Havskov y Ottemöller, 2010).

La ventana de la coda es seleccionada automáticamente comenzando en $t=2t_s$ y es filtrada en las frecuencias centrales elegidas de 1,5-3-9-12-15 Hz. Durante la ejecución del programa CODA Q se muestran las relaciones señal-ruido, los valores calculados de Q y las trazas filtradas correspondientes para cada frecuencia. Las gráficas de estas trazas son utilizadas para una validación visual de la calidad de los datos (Figura 2; Havskov et al., 2011).

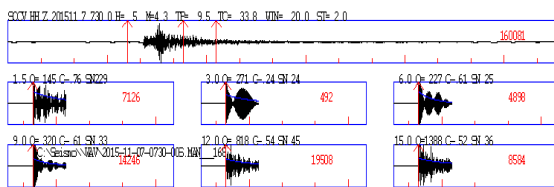


Figura 2. Trazas graficadas y valores de Q para cada frecuencia.

En la Figura 2, la traza en la parte superior no se encuentra filtrada y las 3 flechas verticales indican el tiempo de origen, comienzo y final de la ventana coda respectivamente. Sobre esta traza, en primer lugar, se da el código de la estación y la identificación del evento.

El inicio de la ventana de coda medida desde el origen fue inicialmente seleccionado de forma automática para un lapso de tiempo de $2t_s$, este parámetro considera que en este tiempo la amplitud de la coda, que está en función de la distancia, es casi constante (Rautian & Khalturin, 1978). Esto se

calcula a través del tiempo de origen y el tiempo de llegada de la P asumiendo $V_p/V_s=1,78$ (Havskov et al., 2011).

El programa calcula el factor de calidad Q para una serie de eventos y estaciones (Figura 3) a un número de frecuencias dado y que son definidos en los archivos de entrada. Finalmente, los valores promedios serán calculados con la finalidad de obtener una curva Q vs. f (Havskov et al., 1989).

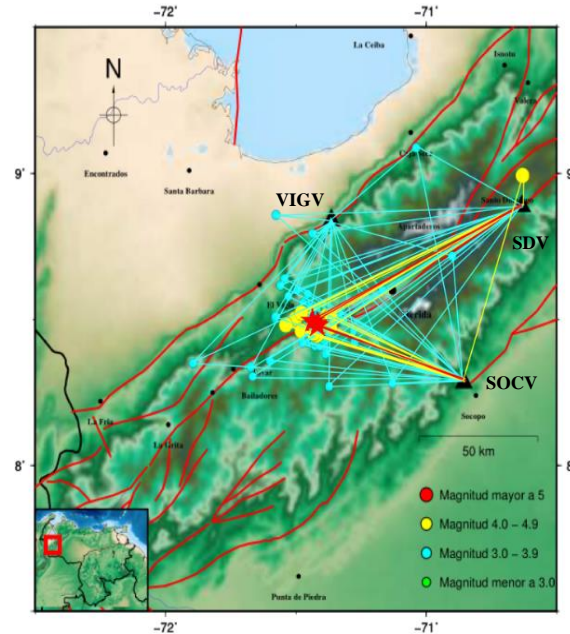


Figura 3. Área de estudio con los sismos que cumplen con el criterio de selección. Mapa base de fallas cuaternarias según Beltrán –comp.- (1993).

Parámetros de entrada utilizados por el programa CODA Q

Los cálculos para la ejecución del programa CODA Q están controlados por un archivo de parámetros el cual incluye: inicio de la ventana de la onda coda, longitud de la ventana, mínima relación señal-ruido, ventana de ruido delante de la señal, frecuencias a utilizar, entre otros parámetros. Por otra parte, existe otro archivo de entrada que contiene toda la información espectral de los eventos, así como su localización y fases seleccionadas durante el análisis.

Archivos de salida (output file) y cálculo del factor de calidad Q

El archivo de salida contiene una copia del archivo de parámetros, una línea para cada combinación estación-evento aceptada por el programa (correlación y relación señal-ruido) y el promedio de valores de Q . De aquí, extraemos los promedios de Q con su frecuencia correspondiente para realizar un

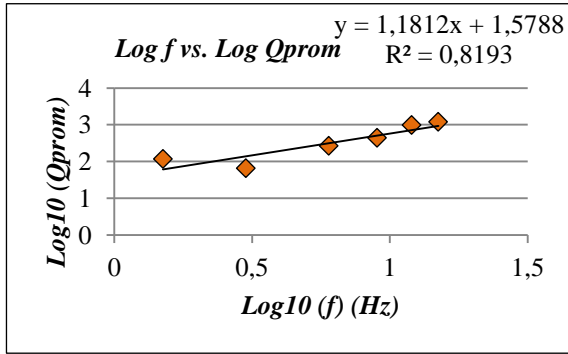


Figura 6. Valores de Q promedio en función de cada una de las 6 frecuencias seleccionadas.

De esta forma, reportando valores promedios, se obtiene $Q_{0prom}=37,91\pm 1,23$, $\alpha_{prom}=1,18\pm 0,05$ y podemos escribir la ley de dependencia frecuencial, $Q(f)=Q_0f^\alpha$, de la siguiente forma:

$$Q_{CODA}(f) = (37,91 \pm 1,23) \cdot f^{(1,18 \pm 0,05)} \quad (2)$$

Para los valores de Q_0 y α se tomaron los valores promedios, ya que en estos se obtuvo un mejor valor en el coeficiente de determinación R^2 , es decir, el modelo utilizado se ajustó mejor al conjunto de observaciones de Q . El grado de dispersión de los parámetros obtenidos es bajo, Q_0 varía entre 36,77 y 39,23, lo cual nos indica que el valor obtenido se encuentra bien ajustado al modelo teórico a pesar de las altas variaciones observadas para ciertas frecuencias. En cuanto al valor de α , el cual varía entre 1,13 y 1,23 y se encuentra aproximadamente dentro del rango aceptado de 0,5 a 1,20 (Singh & Herrmann, 1983).

Los valores de Q_0 obtenidos son bajos en comparación con el que utiliza SEISAN por defecto; con un valor Q_0 de 400 y un α de 0,7. Esto se debe a que el software utiliza valores asociados a las características del medio de Europa occidental, donde existe una sismicidad pasiva y una tectónica de baja atenuación y por lo tanto no se ajusta al medio venezolano. El valor calculado para este estudio es considerablemente bajo, lo cual es razonable debido a la alta actividad tectónica, fracturamiento y fallamiento de la región de los Andes de Mérida. En el caso específico de Lagunillas, se presentan cuencas sedimentarias formadas por procesos trastensivos y fallamiento normal (Schubert, 1980; Alvarado et al., 2007, 2008, 2009; Alvarado, 2008), lo cual contribuye al aumento de la atenuación y como consecuencia a la disminución del factor de calidad Q . Además, el valor obtenido entra en el rango de dispersión

reportado por Sorondo (2015) para occidente, Q_0 entre 38 y 84.

Realizando una comparación entre los estudios donde se ha calculado el factor de calidad Q del medio venezolano para diferentes regiones, podemos notar en primer lugar que todos los valores presentados en la **Tabla 2** son notablemente menores al utilizado por SEISAN ($Q_0=400$). Esto indica que el medio venezolano, en general, presenta una atenuación considerablemente mayor que Europa occidental.

Región	Q_0	α	Referencia
Venezuela	$75\pm 1,09$	$0,96\pm 0,08$	García (2004)
Occidente	61 ± 23	$1,11\pm 0,17$	Sorondo (2015)
Andes de Mérida-Lagunillas	$38\pm 1,23$	$1,18\pm 0,05$	Presente estudio

Tabla 2. Valores de Q y α calculados para Venezuela.

El factor Q es un buen indicador de la situación de esfuerzos en la litósfera (Aki, 1984). Un aumento en los valores de Q corresponde a un cierre de fracturas y compresión del medio, mientras que una disminución del mismo se asocia a apertura y fracturamiento junto a una desconsolidación del medio.

Recálculo de la magnitud de momento (M_w)

Para los 962 eventos sísmicos correspondientes al enjambre sísmico de Lagunillas se observa un aumento general de la magnitud y la variación promedio total vendrá dada por:

$$M_w = M_w(\text{corregida})_{prom} - M_w_{prom} \quad (3)$$

$$\Delta M_w = 0,219$$

Es decir, la magnitud de momento original calculada por FUNVISIS (M_w) para el enjambre sísmico de Lagunillas se encuentra subestimada por un factor promedio de 0,219. Los valores extremos de esta variación, obtenidos a través de la desviación estándar del promedio, varían de 0 a 0,4. Estas variaciones de M_w son comparables con las obtenidas por Sorondo (2015) para el occidente venezolano, obteniendo un $\Delta M_w=0,135$ y valores extremos de 0 y 0,3. Se puede observar que estas diferencias son ligeramente menores que las obtenidas, lo cual podría deberse a que la cobertura para occidente es considerablemente mayor por tratarse de un estudio a nivel regional.

Se realizó un gráfico M_w vs M_w corregida (Figura 7) para obtener una relación entre ambas magnitudes. Esta relación se obtuvo a través de un ajuste lineal con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9473, lo cual permitirá corregir el catálogo sísmico asociado a la zona de estudio.

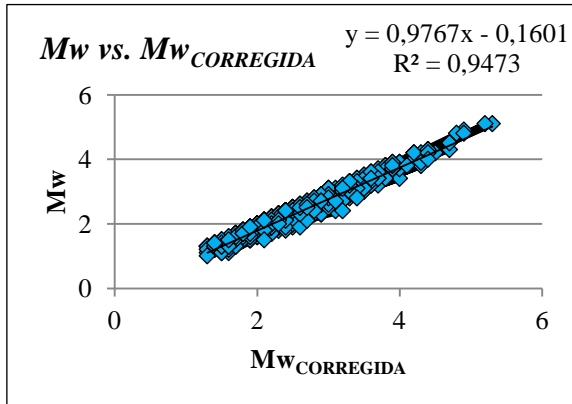


Figura 7. M_w vs M_w corregida.

Finalmente, podemos reescribir la ecuación de la recta del ajuste de la siguiente forma, en función de M_w :

$$M_{w\text{ corregida}} = 1,02M_w + 0,16 \quad (4)$$

Parámetros espectrales

Los valores obtenidos para el logaritmo del momento sísmico ($\text{Log } M_0$) varían de 11 N.m a 17 N.m, como se observa en la Figura 8. Por otra parte, los valores obtenidos para la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) varían de 0,006 bar a 755,8 bar. Este valor alto de 755,8 bar corresponde al sismo de $M_{w\text{ corregida}}=5,3$ y podría indicar que el radio de la fuente obtenido es muy pequeño y que el modelo de Brune (1970) no es una buena aproximación para un evento de tal magnitud. Este modelo de falla circular se usa comúnmente para obtener las dimensiones de la misma a partir del espectro de onda S de un evento de tamaño moderado a pequeño, para los cuales una falla circular es una buena aproximación. Los terremotos de mayor magnitud tienen mayores dimensiones y ya que su ancho está limitado a un aproximado de 20 km, sus longitudes deben ser mayores que sus anchuras. En estos casos se recomienda el uso del modelo de falla rectangular propuesto por Haskell (1964).

Los valores máximos esperados para la caída del esfuerzo, según observaciones de diversos autores, se encuentran alrededor de los 100 bar.

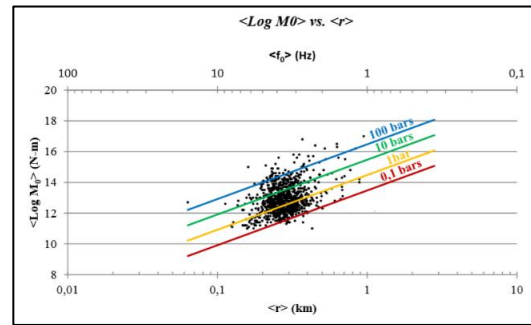


Figura 8. Relación Momento sísmico ($\text{Log } M_0$) vs radio de la fuente (r). Se muestran las líneas de caída de esfuerzo constante.

Es posible tomar en cuenta ambas posibilidades puesto que la resistencia de las rocas varía de lugar a lugar y pueden existir concentraciones de esfuerzos muy altas (Nava, 1987). Archuleta *et al.* (1982) en su estudio de la secuencia sísmica de Mammoth Lakes, California, reporta un valor para la caída de esfuerzo del sismo de mayor magnitud ($ML=6,2$) de 787 bar y éste es asociado al tamaño del radio de la fuente. Por su parte Shearer *et al.* (2006) reporta valores de la caída del esfuerzo de hasta 200 bar para el Sur de California. California, al igual que Lagunillas, se encuentra en una zona de tectónica activa debido a la presencia de la Falla de San Andrés.

Momento sísmico ($\text{Log } M_0$) vs radio de la fuente (r)

De acuerdo con Hanks & Thatcher (1972), la Figura 8 es un gráfico compuesto de los parámetros espectrales del enjambre sísmico: la frecuencia de esquina promedio $\langle f_0 \rangle$, el logaritmo del momento sísmico promedio $\langle \text{Log } M_0 \rangle$ y el radio de la fuente sísmica promedio $\langle r \rangle$.

En la Figura 8 se puede observar que la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) para el 90% de los eventos del enjambre sísmico varía de 0,1 a 100 bar, lo cual coincide con observaciones de diversos autores, especialmente las realizadas por Kanamori & Anderson (1975) para datos que incluyen eventos ocurridos en zonas con tectónica activa de todo el mundo. También se puede observar cómo disminuye el número de sismos con el aumento del momento, lo cual nos indica que el enjambre tiene una menor proporción de sismos grandes en relación a los pequeños o de menor magnitud. A su vez, también se observa como la ruptura aumenta con el aumento del momento sísmico.

Ley de Gutenberg-Richter

Se realizaron dos gráficos, uno en función de M_w y otro en función de $M_{w\text{ corregida}}$ (Figura 9 y Figura 10,

respectivamente), donde se representan las rectas correspondientes a la Ley de Gutenberg-Richter que mejor se ajustan a los 962 eventos del enjambre sísmico de Lagunillas, desde el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo de 2016.

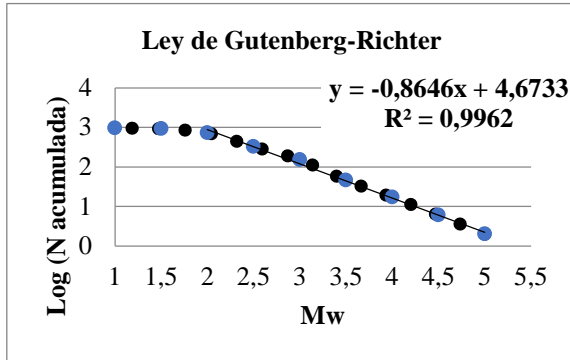


Figura 9. Ley de Gutenberg-Richter en función de la magnitud (M_w) calculada por FUNVISIS.

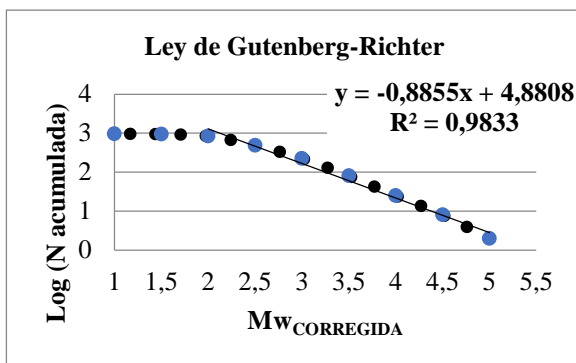


Figura 10. Ley de Gutenberg-Richter en función de la magnitud ($M_{wCORREGIDA}$) calculada en el estudio.

El valor de b para ambos casos, $b=0,8646$ y $b=0,8855$, M_w y $M_{wCORREGIDA}$, respectivamente, se encuentra dentro del rango de valores aceptados, entre 0,6 y 1,5. Además, se observa un aumento del valor de b para las magnitudes corregidas, lo que indica un aumento de la proporción de sismos pequeños con respecto a los grandes. Este aumento del valor b podría indicar que FUNVISIS reportó una menor cantidad de sismos pequeños debido a que los parámetros utilizados para el cálculo de M_w no se encontraban ajustados a las características del medio.

Los valores de b obtenidos para el período de tiempo desde el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo de 2016 coinciden con los obtenidos por Bendito *et al.* (2002), entre 0,5 y 1,25 aproximadamente, en un estudio de la variación espacio temporal de los valores de b en el occidente

venezolano para un período de tiempo desde el año 1960 al 2000.

CONCLUSIONES

Los valores del cálculo del factor de calidad Q obtenidos a través del análisis del decaimiento de la coda y el método *CODA Q* en SEISAN permiten establecer para la zona de Lagunillas, estado Mérida la siguiente ley de dependencia frecuencial: $Q_{CODA}(f) = (37,91 \pm 1,23) \cdot f(1,18 \pm 0,05)$, $1,5 \text{ Hz} < f < 15 \text{ Hz}$.

El valor de $Q_0 = 37,91 \pm 1,23$ obtenido es notablemente más bajo en relación al utilizado por SEISAN, $Q_0=400$, asociado a Noruega-Europa Occidental. Este era el valor utilizado por FUNVISIS para el cálculo de M_w y no se encuentra ajustado a las características del medio venezolano.

El valor de Q_0 calculado es bajo, aunque no de forma considerable en relación con los valores obtenidos por Sorondo (2015) y García (2004), $Q_0= 61 \pm 23$ y $Q_0= 75 \pm 1,09$, para el occidente y para todo el territorio venezolano respectivamente.

Lagunillas pertenece a una zona de tectónica activa y alta sismicidad debido a la presencia de la Falla de Boconó y por lo tanto la región se encuentra fallada y fracturada, además de presentar cuencas sedimentarias formadas por procesos transtensivos y fallamiento normal, lo cual contribuye a un aumento de la atenuación, y como consecuencia, a una disminución del factor de calidad Q .

Se demostró que las magnitudes calculadas por FUNVISIS para esta zona se encontraban subestimadas por un factor promedio de 0,219 y cuyos valores extremos están entre 0 y 0,4.

La obtención de un factor de calidad Q ajustado a la zona permitió la obtención de un momento sísmico fiable que a su vez permitió el cálculo correcto de las magnitudes del enjambre sísmico.

El 90% de los eventos asociados al enjambre sísmico de Lagunillas poseen caídas de esfuerzo que oscilan entre 0,1 y 100 bar, lo cual coincide con observaciones hechas por diversos autores de miles de sismos alrededor del mundo. Sin embargo, el modelo de Brune (1970) utilizado en este estudio es un modelo aproximado de lo que realmente ocurre en el enjambre sísmico de Lagunillas.

El valor de b asociado a la Ley de Gutenberg y Richter muestra un aumento para las $M_{wCORREGIDA}$ del

enjambre sísmico. Esto indica que FUNVISIS reportó una menor proporción de sismos pequeños debido a que el cálculo de las magnitudes no se encontraba ajustado a las características del medio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros por sus comentarios y sugerencias. Las figuras se generaron con el programa GMT (Wessel & Smith, 1991).

REFERENCIAS

- AKI, K., 1969. Analysis of the Seismic Coda of local earthquakes as scattered waves. *J. Geophys. Res.*, 74: 6215-6231.
- AKI, K., 1984. Theory of earthquake prediction with special reference to monitoring of the quality factor of the lithosphere by the coda method. *Proc. U.S. Japan Symposium on Earthquake Prediction*, Tokyo, noviembre 1983.
- AKI, K. & CHOUET, B., 1975. Origin of Coda waves: Source, Attenuation and Scattering effects. *J. Geophys. Res.*, 80: 3322-3342.
- ALVARADO, M., 2008. Caracterización Neotectónica de la cuenca de Las González, estado Mérida, Venezuela. Trabajo Final de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 89 p (inédito).
- ALVARADO, M., AUDEMARD, F.A., LAFFAILLE, J., OLLARVES, R. & RODRIGUEZ, L. M., 2007. Análisis paleosísmico de la falla de Boconó en el sector Lagunillas, estado Mérida, Venezuela 9° Congreso Geológico Venezolano, Caracas, CD, 7 p.
- ALVARADO, M., AUDEMARD, F.A., LAFFAILLE, J., OLLARVES, R. & RODRÍGUEZ, L. M., 2008. Paleoseismic investigation on the Boconó fault between Las González and Estanques, Mérida Andes, Venezuela, 7° International Symposium on Andean Geodynamics, Nice, Francia, Resúmenes, 37-40.
- ALVARADO, M., AUDEMARD, F.A., LAFFAILLE, J., OLLARVES, R. & RODRÍGUEZ, L.M. 2009. Paleoseismic analysis of the Boconó fault, between the La Gonzalez-Estanques towns, Mérida state, Venezuela. 7° International Conference on Geomorphology, Melbourne, Australia, CD, Abstracts.
- ARCHULETA, R. J., CRANSWICK, E., MUELLER C. & SPUDICH, P., 1982. Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquake sequence, *J. Geophys. Res.*, 87(B6): 4595-4607.
- BELTRÁN, C., 1993. Mapas de fallas cuaternarias de Venezuela. Escala 1:2000.000. FUNVISIS.
- BENDITO, A., RIVERO, P., & LOBO QUINTERO, W., 2002. Localización de probables asperezas en el occidente venezolano, mediante tiempos mínimos de recurrencia local. *Boletín Técnico IMME*, 40(3): 27-39.
- BRUNE, J. N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75 (26): 4997-5009.
- GARCÍA, G., 2015. Calibración Mc-Mw para sismos en el oriente de Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, 37-59.
- GARCÍA, S., 2004. Determinación del Factor de Calidad Q para Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas, 4-50.
- GONZÁLEX-DRIGO, R., PÉREZ-GRACIA, V., PUJADES, L., CASELLES, O. & CANAS, J.A., 2003. Distribución de Q de coda y análisis de la atenuación sísmica intrínseca y dispersiva en la Península Ibérica. *Rev. Int. Mét. Num. Calc. Dis. Ing.*, 19(2): 211-237.
- GUTENBERG, B. & RICHTER C. F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34: 185-188.
- HANKS, T. C. & THATCHER, W., 1972. A graphical representation of seismic source parameters, *J. Geophys. Res.*, 77: 4393-4405.
- HANKS, M. & KANAMORI, H., 1979. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84: 2348-2340.
- HASKELL, N.A., 1964. Total energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54: 1811-1841.
- HAVSKOV, J., MALONE S., MCCLURG, D. & CROSSON, R. (1989). Coda Q for the state of Washington. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79: 1024-1038.
- HAVSKOV, J. & OTTEMÖELLER, L. (1999). SeisAn Earthquake analysis software. *Seis. Res. Lett.*, 70. http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_70/srl_70-5_es.html.
- HAVSKOV, J. & OTTEMÖELLER, L. (2010). Routine Data Processing in Earthquake Seismology with Sample Data. Universidad de Bergen, Noruega.
- HAVSKOV, J., OTTEMÖELLER, L. & VOSS, P., 2011. Seisan Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and Mac OS X. Universidad de Bergen, Noruega.
- KANAMORI, H. & ANDERSON D.L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1073-1096. Knopoff, L. (1964). Q. *Rev. Geophys.*, 2(4): 625-660.

- NAVA, A.F., 1987. Terremotos. Fondo de cultura económica, Col. La Ciencia desde México. México D.F.
- SAAVEDRA, M. J., 2015. Modelos corticales de velocidades en la región occidental de Venezuela, zona centro-sur de los Andes. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas.
- SCHUBERT, C., 1980. Late Cenozoic pull apart basins, Bocono fault zone, Venezuelan Andes. *J. Struct. Geol.*, 2 (4): 463-468.
- SHEARER, P. M., PRIETO, G.A. & HAUSSON, E. (2006). Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California, *J. Geophys. Res.* 111.
- SINGH, S. & HERRMANN, R. B., 1983. Regionalization of crustal coda Q in the continental United States, *J. Geophys. Res.*, 88(B1); 527-538.
- SORONDO, F. E. (2015). Estimación del factor Q para el occidente venezolano. Calibración de la magnitud de momento con la magnitud de Fiedler. Trabajo especial de grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas.