

## RELACIÓN DE MAGNITUD DE CODA PARA EL ORIENTE VENEZOLANO

### CODA MAGNITUDE SCALES FOR THE NORTHEAST OF VENEZUELA

FRANCISCO BONIVE

*Universidad de Oriente, Centro de Sismología, Cumaná, Venezuela.*

#### RESUMEN

Se obtuvo una expresión para calcular la magnitud de coda válida para la región nororiental venezolana. La zona geográficamente abarca el límite sur oriental de la placa tectónica del Caribe en la frontera con la placa suramericana, definida con la zona de fallas de El Pilar. Los 254 eventos utilizados fueron detectados entre los años 1998 y 2000, por la red de estaciones del Centro de Sismología de la Universidad de Oriente, con magnitudes reportadas por el Seismic Research Unit of The University of The West Indies, ubicado en la isla de Trinidad. Esta relación fue calculada resolviendo un sistema sobredeterminado de ecuaciones usando el método de Singular Value Decomposition (SVD), para la ecuación empírica propuesta por Lee. La expresión conseguida es válida para un rango de magnitudes comprendidas entre 2,2 y 4,3 y distancias hipocentrales entre 12 y 370 km, siendo su dispersión con respecto al patrón (datos de Trinidad) menor al 8%, y con los resultados de otras expresiones locales menor al 14%.

Palabras claves: Magnitud, Coda, SVD, Caribe, El Pilar, Venezuela.

#### ABSTRAC

An expression was obtained to calculate the valid coda magnitude for the Venezuelan northeast. The zone comprises the southeastern boundary of the Caribbean Tectonic Plate, bordering with the South American Plate zone known as the El Pilar Fault. The 254 events considered had been detected between 1998 and 2000 by the station network of the Seismology Center of the Universidad de Oriente, and their magnitudes reported by the Seismic Research Unit of the University of The West Indies, in Trinidad. An overdetermined system of equations was resorted to in order to calculate this data relation using the Singular Value Decomposition method (SVD) for the empirical equation proposed by Lee (1972). The magnitude-hypocentral distance distribution thus obtained is valid for magnitudes ranging between 2.2 and 4.3, and for hypocentral magnitudes between 12 and 370 km, its dispersion values relative to the Trinidad pattern data set and to other local expressions being smaller than 8% and 14%, respectively.

Key words: Coda magnitude, SVD, Caribbean Plate, El Pilar, Venezuela

#### INTRODUCCIÓN

La magnitud de un terremoto es una medida instrumental de la energía liberada por el evento; siendo importante obtenerla con precisión y estandarizada entre los diversos equipos de sensores existentes en una zona geográfica dada. La magnitud sísmica fue concebida, como cualquier magnitud física, de modo comparativo con respecto a un patrón, el cual fue propuesto por Richter en 1935 como el sismo de magnitud cero. La relación entre el logaritmo de la amplitud registrada y el logaritmo de la amplitud teórica del sismo patrón a la misma distancia, fue la definición inicial de magnitud que en la actualidad se llama magnitud local (MI). Esta magnitud es una entre

varios tipos que en el presente existen, dependiendo de qué parte de la señal sísmica se utilice para determinarla. Tenemos magnitudes de coda ( $M_c$ ), de ondas superficiales ( $M_s$ ), de ondas corpóreas ( $M_b$ ) y otras que involucran un tratamiento integral de la señal sísmica, como es la propuesta por Kanamori (1977), la cual se denota como ( $M_w$ ), la cual es basada en el momento sísmico. Las magnitudes son empíricamente determinadas para una región específica y se consideran válidas en esa zona (Bakun and Joiner 1984; Hutton y Boore 1987; Alsker *et al.* 1991).

Desarrollada fundamentalmente en un trabajo realizado a comienzo de la década de los setenta (Lee

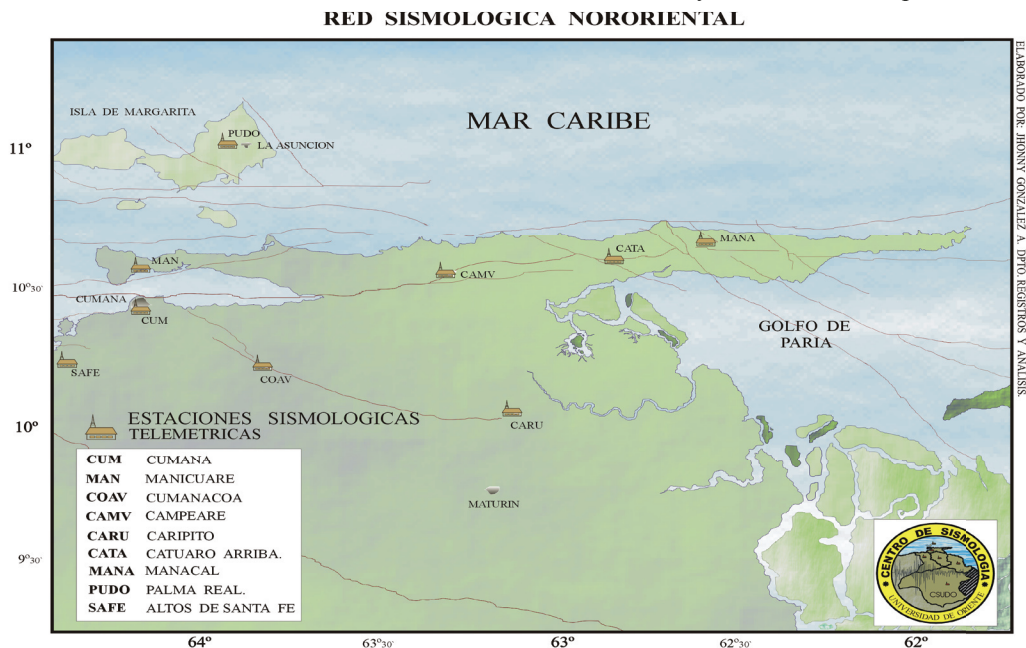
et al 1972), señala este tipo de magnitud que ha tomado gran popularidad por la relativa sencillez con que puede medirse la longitud de la señal sísmica y por aparente baja dependencia de los parámetros corticales que afectan a los otros tipos de magnitudes. Uno de los problemas más importantes que inciden en los cálculos de magnitud de coda es determinar, en el sismograma, donde finaliza la señal sísmica, es decir, diferenciar entre la coda y el ruido. La longitud de la coda se toma generalmente hasta donde la señal se confunde con el nivel de ruido, aunque se pueden conseguir lecturas realizadas hasta el doble del nivel de ruido, no obstante, esto ha sido poco documentado, en el presente estudio utilizamos el nivel promedio de ruido. En relación con la determinación de la expresión para calcular la magnitud de coda el problema más importante es elegir una magnitud de referencia confiable y aceptada mundialmente. Afortunadamente en nuestro caso, el área de interés incluye la zona de la isla de Trinidad en la que hay un centro de sismología de reconocida y larga trayectoria que permitió obtener magnitudes que cumplían muy bien con las características necesarias para ser consideradas patrón. Así que, en la presente investigación se utilizó como magnitud patrón las reportadas por la Universidad de West Indian, referida por el NEIC (*NATIONAL EARTHQUAKE INTERNATIONAL CENTER*). Además los sismos a los cuales se les asocia, deben haber sido registrados en un número significativo, por la red de sensores a la que se le desea determinar la relación de coda, en este trabajo, la red de sensores pertenecientes al Centro de Sismología de la Universidad de Oriente, Venezuela.

La región nororiental de Venezuela se ubica sobre el margen de placas Caribe-Suramérica (figura 1), y presenta una actividad sísmica importante con terremotos históricos que han sido asociados fundamentalmente al sistema de fallas de El Pilar. A pesar de la importancia sísmica del área se han obtenido pocas relaciones de magnitud de coda para la zona, las cuales, debido a su carácter empírico, son factibles de mejoras, ya que dependen de su obtención, de la calidad de los registros sísmicos, eficiencia en cómputos, entre otros parámetros que mejoran con los avances tecnológicos en equipos y sistemas informáticos. Las relaciones se han utilizado hasta ahora es una expresión modificadas a una obtenida hace más de veinte años (Mendoza 1981; Ramos y Mendoza 1991) u otras calibradas con ésta, como la de Malavé (inédito).

En este trabajo se obtendrá una expresión para la magnitud de coda para sismos en la región Nororiental de Venezuela.

### DATOS Y MÉTODOS

Los eventos sísmicos utilizados en el presente estudio están ubicados a una distancia epicentral menor a 400 km de las estaciones pertenecientes a la Red Sismológica de la Universidad de Oriente (**ReSUDO**), administrada por el Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (**CSUDO**), cuyos sensores sismográficos, nueve en ese momento, se encuentran ubicados en la región nororiental de Venezuela y su localización se puede ver en la figura 1.



**FIGURA 1.** MAPA GEOGRAFICO DE LA ZONA NORORIENTAL DE VENEZUELA DONDE SE SEÑALAN LA UBICACION DE LAS ESTACIONES DE LA RED SISMOLOGICA DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE (UDO).

Se usaron 254 sismos, cuyos epicentros fueron localizados con datos de más de 4 estaciones sismográficas y además reportados por las estaciones del Seismic Research Unit of The University of The West Indies, Trinidad.

Los eventos sísmicos se localizaron usando el programa **Hypocenter** (Barry 1994), el cual es un algoritmo utilizado para tal fin, y considerado estándar en la obtención de los hipocentros en la sismología actual. Todo el procesamiento se realizó en el entorno del Seisan (Havskov y Ottemöller 1999), programa desarrollado para manejar todos los aspectos cotidianos de la actividad sísmica, desde la adquisición de datos hasta la producción de mecanismos focales. Una vez consolidada la lista de eventos que tuvieran magnitud patrón asociada, se procesaron usando un método estándar (Press *et al.* 1992) de resolución de sistemas sobredeterminados basado en la técnica SVD (Singular Values Decomposition) utilizándose el que se halla en la librería de funciones del Matlab® (**Mathwords**), referida en publicación (Anderson *et al.* 1999). Se usó este proceso porque es considerado uno de los procedimientos más estables en lo que respecta a la resolución de este tipo de sistema sobredeterminado.

Hemos usado como magnitudes de referencia (**MP**) las reportadas por el Seismic Research Unit of The University of The West Indies, St Augustine, Trinidad, W.I., y se obtuvieron por consultas por Internet de la base de datos en web del **NEIC** (**NATIONAL EARTHQUAKE INTERNATIONAL CENTER**).

Para obtener la relación de magnitud de coda para la región de estudio, nos basamos en la ecuación empírica propuesta por (Lee *et al.* 1972):

$$MC = a1 * \log (Z) + a2* \Delta + a3* h + a4 \quad (1)$$

donde **MC** es la magnitud de coda, **Z** es la coda o duración de la señal sísmica en segundos,  $\Delta$  es la distancia epicentral y **h** es la profundidad, las dos últimas en kilómetros, **a1, a2, a3, a4** son los coeficientes a determinar.

Actualmente se unifican la distancia epicentral y la profundidad en un solo término representado por la distancia hipocentral ( $\delta$ ) así, la expresión nos queda de la siguiente manera:

$$MC = a1 * \log (Z) + a2* \delta + a3 \quad (2)$$

donde  $\delta$  es la distancia hipocentral, en kilómetros, **a1, a2 y a3** son los coeficientes a determinar. La mayoría de los algoritmos en la actualidad utilizan la relación 2.

El sistema de ecuaciones se plantea basado en la ecuación 2 y se especifica de la siguiente manera:

$$MP_i = a1 * \log (Z_i) + a2* \delta_i + a3 \quad (3)$$

donde **MP** es la magnitud patrón registrada para el *i*ésimo evento, **Z** y  $\delta$  son la coda y la distancia epicentral del mismo. Así que normalmente tenemos 3 constantes a determinar e *i* eventos, que en el presente trabajo son 254. Esto representa 254 ecuaciones para determinar 3 parámetros, en pocas palabras, un sistema sobredeterminado.

Para valorar los resultados y comparar cuantitativamente con la magnitud patrón, se evaluó la dispersión absoluta entre las magnitudes calculadas y las usadas como referencia,

$$Dmag = \frac{\sum_{i=1}^n |MC_i - MP_i|}{n} \quad (4)$$

así como de la dispersión porcentual dada por la siguiente expresión:

$$Dmagl = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{MC_i - MP_i}{MP_i} \right) * 100 \right|}{n} \quad (5)$$

en ambas *n* es el número de eventos, **MC<sub>i</sub>** es la magnitud de coda calculada con la expresión 2 y **MP<sub>i</sub>** la magnitud usada como referencia, para el *i*ésimo sismo. Se realizó también la comparación con las magnitudes calculadas con la relación (Malavé, inédito):

$$MC = 2,4663 * \log (Z) - 1,5535 \quad (6)$$

que en la actualidad se utiliza en el centro de sismología de la Universidad de Oriente.

RESULTADOS

Los resultados se sintetizan en varias tablas, las cuales comentamos a continuación.

En la tabla 1 se puede observar el resultado de la resolución del sistema sobredeterminado de la ecuación 3, en la que se consiguieron tres coeficientes. En esta se les presenta con sus respectivos errores porcentuales, el número de eventos usados y los límites tanto en distancia hipocentral como de magnitud donde son válidas las expresiones calculadas, así que la expresión 2 quedaría de la manera siguiente:

$$MC = 1,72 * \log (Z) - 0,00017 * \delta + 0,23 \quad (6)$$

Se pueden notar dos resultados importantes en los parámetros obtenidos, primero el bajo valor de a2, y en segundo lugar, el error tan grande que lo caracteriza. Si se analizan las contribuciones de este factor, se encuentra, en el peor de los casos ( $\delta = 360$  Km.), afecta el valor de la magnitud en cuatro décimas de magnitud, lo que supondría un error del 12% para una magnitud 3,5, hay que recalcar que la mayoría de los eventos se hallan a distancias mucho menores. Esto sugiere la posibilidad de plantearnos una nueva expresión de coda que no tenga este factor por lo que la expresión 2 quedaría en la forma:

$$MC = a1 * \log (Z) + a2 \quad (7)$$

Y si sustituimos los valores de las constantes conseguidos y señalados en la tabla 2 quedaría de la forma:

$$MC = 1,67 * \log (Z) + 0,29 \quad (8)$$

Los resultados asociados a esta expresión se pueden visualizar en la tabla 2 y en ella se puede ver que, a pesar de que no está presente el coeficiente relacionado con la distancia hipocentral el error asociado al coeficiente independiente (a3 en ecuación 2 y a2 en ecuación 7 mantienen valores aproximadamente iguales) se mantiene, predominantemente, en los valores observados en la tabla 1. Puede notarse en la tabla 3 que las dispersiones con respecto a la magnitud patrón (MP), demag y demag1 (expresiones 4 y 5), son prácticamente iguales, esto por lo tanto permite despreciar el coeficiente a2 de la ecuación 2.

Debido a la falta de información con respecto a la fecha cuando empezó a calcularse la magnitud de coda con la relación 5 (Malavé, 1981) en CSUDO, se hace imposible hacer una comparación directa entre las dos relaciones de coda involucradas. Se decidió computar las magnitudes, las cuales se llamaron “*originales*”, usando la expresión 5 para poder calcular la dispersión con respecto a las generadas por la expresión 8. Se hizo además, el cálculo de las dispersiones con las magnitudes reseñadas en los boletines del centro de sismología cuyo grupo se le denominó como “*reportadas*”. Para abarcar una discusión mucho mas amplia se decidió realizar es mismo procedimiento con la relación 6. Estas dispersiones calculadas son reseñadas en la tabla 3.

**Tabla 1:** Resultados totales basados en la ecuación 2 y los errores porcentuales obtenidos directamente del método de la SVD.

Expresión	Coef.	Valor	Error%	Eventos	Rango de distancia y Magnitudes
	a1	1,716	% 0,003		
MC = a1*log (Z) + a2* δ + a3	a2	-0,00017	% 651	254	(12,0-69,0) Kms (2,2-4,3) Mag
	a3	0,229	% 1,578		

**Tabla 2:** Resultados totales basados en la ecuación 7 y los errores porcentuales obtenidos directamente del método de la SVD.

Expresión	Coef.	Valor	Error%	Eventos	Rango de distancia y Magnitudes
	a1	1,667	% 0,003		
MC = a1*log (Z) + a2	a2	0,292	% 651	254	(12,0-369,0) Kms (2,2-4,3) Mag

**Tabla 3:** Los Resultados de las dispersiones  $d_{mag}$  y  $d_{magl}$ , expresiones 4 y 5, entre las magnitudes conseguidas usando las expresiones 6 y 7, respecto a los grupos de magnitudes patrón (MP), originales y reportadas..

Magnitudes	$MC = 1,72 * \log (Z) - 0,00017 * \delta + 0,23$		$MC = 1,67 * \log (Z) + 0,29$	
	<b>Dmag</b>	<b>Dmagl (%)</b>	<b>Dmag</b>	<b>Dmagl (%)</b>
<b>MP</b>	0,2546	7,0385	0,2537	7,0359
<b>Originales</b>	0,3304	10,7836	0,3328	10,7510
<b>Reportadas</b>	0,4070	13,0524	0,4064	10,0798

### DISCUSIÓN

A pesar de que en la sección de resultados se demostró que se puede despreciar el término  $a_2$ , de la expresión original 2, y convertirla en la ecuación 7, se decidió trabajar con la expresión encontrada 6 para mejorar el alcance de la discusión y referenciarla en las conclusiones para que pueda ser contrastada en futuros trabajos. Se puede dividir el análisis sobre las expresiones de coda obtenidas 6 y 8 en dos direcciones, la primera en relación a los errores absolutos encontrados para los parámetros  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  (tablas 1 y 2), y la segunda, en el sentido de las dispersiones entre las magnitudes calculadas con las expresiones 6 y 8 con respecto a las magnitudes patrón (MP), las originales y las reportadas (tabla 3). Los errores están muy vinculados con el procedimiento de obtención de parámetros y los valores conseguidos permiten señalar que el procedimiento de resolución de este sistema sobredeterminado (ecuación 3) a través de la SVD resultó bastante apropiado, ya que porcentualmente resultaron ser menores al 10%, a pesar de lo heterogéneo de la data usada, en el sentido de la diversidad de estaciones sismográficas utilizadas. Las dispersiones están asociadas más con lo apropiada de la función empírica 1, la estabilidad estadística de las magnitudes usadas de patrón, entre otras cosas que se pueden considerar menos relevantes.

Se puede observar en la tabla 3, la estrecha similitud entre las dispersiones  $d_{magl}$  y  $d_{mag}$  para las expresiones 6 y 8, lo que permite usar una razón adicional para despreciar el coeficiente  $a_2$  (se había sugerido desecharlo por la baja contribución de este factor a el cálculo final de la magnitud), que acompañaba a la distancia hipocentral en la relación 2, es viable y no cambia sustancialmente los resultados. De acuerdo a esto se podría suponer que la relación empírica establecida 1 y por añadidura la 2 no necesitan la contribución de los factores geométricos (distancias y profundidades). Es difícil que no exista

esta dependencia, así que, se debe analizar con cuidado este resultado. Se puede empezar examinando las tres características que hacen diferente a este parámetro, la primera es su bajo valor, la segunda el alto error asociado a el y la tercera, es la alta valoración de la variable que la acompaña, como lo es, la distancia hipocentral en kilómetros, la cual puede llegar hasta los 360 Km. La primera característica se puede explicar usando la tercera, el procedimiento resolutivo trato de compensar el alto rango de distancia hipocentral con un valor mínimo de ajuste del parámetro, así que este se obtuvo de manera forzada por las condiciones del sistema de ecuaciones, en otras palabras, el sistema perdió robustez por el contraste de rango entre las variables. Esto se refleja en el alto valor de error encontrado, así que, lo más factible es que realmente exista la dependencia espacial. Para subsanar esto se recomienda, para futuras investigaciones, dos cosas. La primera es adicionar al proceso SVD un procedimiento que haga mínimo el impacto de la diferencia de rango de las variables, esto significa atender más las operaciones numéricas y modelaje, la segunda es la deducción de otra relación empírica que ajuste de otra manera las variaciones geométricas.

### CONCLUSIONES

Lo señalado hasta aquí permite establecer las siguientes conclusiones

1. Se obtuvo una relación para calcular la magnitud de coda en el oriente venezolano aplicable para el rango de magnitudes entre 2,2 y 4,3 y distancias hipocentrales entre 12,0 y 369,0 Km. De las estaciones sismológica de CSUDO, con 254 eventos la cual es la siguiente:

$$MC = (1,7157 \pm 0,0000) * \log (Z) - (0,00017 \pm 0,00110) * \delta + (0,2293 \pm 0,0034) \quad (8)$$

con una variación de 0,25 magnitud (7%) con respecto a la magnitud de referencia (MP).

2. Más conveniente resulta, por los errores asociados a los coeficientes de la anterior expresión y valida en los mismos límites la siguiente expresión:

$$MC = (1,6669 \pm 0,0005) * \log (Z) + (0,2916 \pm 0,0037) \quad (9)$$

con una variación de 0.25 magnitud (7%) con respecto a la magnitud de referencia (MP).

### AGRADECIMIENTO

Principalmente quiero señalar el arduo trabajo realizado por el grupo de analistas del centro de sismología de la Universidad de Oriente, en el tratamiento de la señal sísmica, al licenciado Rafael Figueroa, por su asesoramiento en algunos tópicos de programación y al Profesor Luís Daniel Beauperthuy, por sus acertadas recomendaciones.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ALSKER A., KVAMME L.B., HANSEN R.A., DAHLE A. & BUNGUM H. 1991. The MI scale in Norway. Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2, 379-389.
- ANDERSON E. Z., BAI C., BISCHOF S., BLACKFORD J., DEMMEL J., DONGARRA J., DU CROZ A., GREENBAUM S., HAMMARLING A., MCKENNEY & SORENSEN D. 1999. LAPACK User's Guide, Third Edition, SIAM, Philadelphia.
- BAKUN W.H., JOINER W, 1984. The MI scale in central california. Bull. Seism. Soc. Am., 74, 5, 1827-1843.
- BARRY L. 1994. HYPOCENTER 3.2. manual de Seisan. (University of Bergen, Department of Earth Science).
- Havskov, J. and OTTEMÖLLER, L. 1999. SEISAN: THE EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE FOR WINDOWS, SUNOS, SOLARIS AND LINUX Version 7.0, University of Bergen, Department of Earth Science.
- HUTTON L. K. and BOORE D. 1987. The MI scale in Southern California. Bull. Seism. Soc. Am. 77,2074-2094.
- KANAMORI H. 1977. Magnitude scale and quantification of earthquake. Tectonophysics, 93, 185-199.
- LEE W. H. K., BENNETT R. E. and MEAGHER L. 1972. A method for estimating magnitude of local earthquakes from signal duration, U.S.G.S Open files report.
- MENDOZA, J., 1981. Determinación de la magnitud Mb. Red Telemétrica Nacional. (FUNVISIS).
- MALAVÉ C., 1999. Determinación de una relación de magnitud local usando la duración de la señal sísmica. Tesis de grado. (Universidad De Oriente, Núcleo Sucre).
- NEIC. National Earthquake International Center, <http://neic.usgs.gov/>.
- PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VATTERLING, W., FLANNERY, B. 1992. Numerical Recipes in C. Cambridge University Press, 59-70pp
- RAMOS, C., MENDOZA, J. 1991. Relación VP/VS para Venezuela y Zonas Adyacentes. (FUNVISIS).