

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**DETERMINACIÓN DE UNA ESCALA DE MAGNITUD LOCAL PARA EL
NORESTE DE MÉXICO**

PRESENTA

ING. EDGAR GILBERTO PAZ MARTÍNEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

DICIEMBRE, 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



Tesis de maestría

Determinación de una escala de magnitud local para el noreste de México

Presenta
Ing. Edgar Gilberto Paz Martínez

Vo. Bo.

Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta
Director de Tesis

Dra. Xyoli Pérez Campos
Co-Director de Tesis

Dr. Arturo Iglesias Mendoza
Co-Director de Tesis

Linares, Nuevo León, México

Diciembre, 2017

Agradecimientos

A mi papá, por ser el mejor papá.

A Mariana por siempre escucharme.

Al dr. Juan Carlos Montalvo, por su ejemplo, paciencia y disposición.

Al dr. Fernando Velasco y a Luis Carlos, por confiar en mí.

A la dra. Xyoli Pérez y al dr. Arturo Iglesias, por su disposición y comentarios

A Rocío por tanto.

A Luis por siempre estar dispuesto a ayudarme.

A Carmen por siempre escuchar mis preguntas.

A los del otro cubo: Angélica, Jessica e Immer y Brenda, por hacer más bonitas las tardes.

A los del cubo antiguo: Paulina y Jorge.

Al personal del SSN, por su disponibilidad y gran trabajo.

A los profesores Navarro, Méndez y Alva, porque siempre aprendo algo nuevo al platicar con ellos.

Resumen

Con la intención de contribuir al mejoramiento del análisis de riesgo sísmico en el noreste de México, en este trabajo se presenta la primera escala de magnitud local M_L y la primera revisión sobre la atenuación para la región.

Fueron seleccionados y relocalizados 381 sismos que ocurrieron en la región de 2006 a 2015 con un rango de magnitud de $1.9 \leq M_c \leq 4.5$, y los registros se convolucionaron con la respuesta de un sísmógrafo Wood-Anderson para medir el valor de máxima amplitud en las componentes horizontales.

Se partió de la ecuación

$$M = \log(A) - \log(A_0)$$

donde A es la mayor amplitud registrada en un instrumento específico, y $\log A_0$ es la curva de referencia que puede escribirse como

$$-\log A_{ij} = n \log\left(\frac{r_{ij}}{100}\right) + K(r_{ij} - 100) + 3.0 - M_{L_j} + S_j,$$

donde n y K son parámetros relacionados con la dispersión geométrica y atenuación anelástica, respectivamente, A_{ij} es la máxima amplitud horizontal del i -ésimo evento observada en la j -ésima componente de la estación, r_{ij} es la distancia epicentral del i -ésimo evento a la j -ésima componente de la estación, M_{L_j} es la magnitud local del i -ésimo evento, y S_j es el factor de corrección de la j -ésima componente de la estación.

$\log(A_0)$ se representó de forma matricial como $Gm = d$ y se resolvió por medio de una descomposición en valores singulares para encontrar simultáneamente 381 valores de M_L , 12 valores de corrección para las componentes horizontales de las estaciones LNIG, MNIG, GTIG, MCIG, RPIG y AAIG, junto con un valor de dispersión geométrica n y atenuación K , para obtener

$$-\log A_0 = 0.4136 \left(\frac{r}{100} \right) + 0.0001 (r - 100) + 3.0.$$

Al comparar esta curva $\log A_0$ con las que se han obtenido en otras regiones, se destaca una similitud entre la atenuación del noreste de México y la que se ha obtenido para el centro de Estados Unidos.

El rango de M_L que se obtuvo para los 381 sismos es de $1.2 \leq M_L \leq 5$ y se observó que en general los valores de M_L son menores a los de M_c , reportados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), y se relacionan como sigue:

$$M_L = 0.8840M_c - 0.0538.$$

Por último se calcularon valores de a y b en una relación Gutenberg-Richter, dando como resultado

$$\log N = 5.28 - 1.08M,$$

donde N es el número de eventos acumulados en la región para una ventana de tiempo específica con magnitudes iguales o mayores a M . El valor alto de b obtenido implica una concentración de esfuerzos de cizalla bajos y ambientes de fallamiento normal en la región.

Abstract

This work presents the first local magnitude scale M_L and the first approach to an evaluation of attenuation in the northeast of Mexico, with the aim of contributing to the enhancement of seismic hazard and risk assessment in the region.

381 earthquakes were selected and relocated. All earthquakes occurred in the region in the 2006-2015 period with a magnitude range of $1.9 \leq M_c \leq 4.5$. Seismograms were convolved with a Wood-Anderson seismometer response in order to measure the maximum amplitude value recorded in the horizontal components.

If

$$M = \log(A) - \log(A_0),$$

where A is the maximum amplitude in a synthetic Wood-Anderson seismogram and $\log A_0$ is a reference curve that can be written as

$$-\log A_{ij} = n \log\left(\frac{r_{ij}}{100}\right) + K(r_{ij} - 100) + 3.0 - M_{L_j} + S_j,$$

where n and K are parameters related to geometrical spreading and anelastic attenuation respectively, r is the epicentral distance, M_L is the local magnitude, S is the station correction value and the subscripts i and j refer to the event and station, respectively. Then, $\log A_0$ can be represented in a matrix form as $Gm = d$ and solved using a singular value decomposition to simultaneously find 381 M_L values, 12 station correction values for horizontal components in stations LNIG, MNIG, GTIG, MCIG, RPIG and AAIG, and a geometrical spreading n and anelastic attenuation K value:

$$-\log A_0 = 0.4136\left(\frac{r}{100}\right) + 0.0001(r - 100) + 3.0.$$

A great similitude is observed between the attenuation curve for the northeast of Mexico and that obtained in the central United States.

The resulting values have a magnitude range of $1.2 \leq M_L \leq 5$ and are generally lower than the reported M_c values from the Servicio Sismológico Nacional (SSN). Both sets are related as follows:

$$M_L = 0.8840M_c - 0.0538.$$

Also, a and b values were calculated in a Gutenberg-Richter relation, resulting in

$$\log N = 5.28 - 1.08M$$

where N is the number of earthquakes with magnitude greater than or equal to M . This high b value implies a normal faulting environment and a low shear stress concentration for the region.

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	5
Lista de figuras	9
Lista de tablas	10
1. Magnitud local	1
1.1. El concepto de magnitud	1
1.2. Magnitud local de Richter	3
1.3. El sismómetro Wood-Anderson	4
1.4. Definición original de magnitud local	5
1.5. Modificaciones a la definición original de magnitud local	8
1.6. Curva de atenuación $-\log A_0$	9
1.7. Magnitud local en México	12
1.8. Magnitud local en la actualidad	13
1.9. Objetivos de este trabajo	14
1.10. Justificación de este trabajo	14
2. Base de datos y metodología	17
2.1. Selección de los registros de la base de datos	17
2.2. Relocalización de los sismos	19
2.3. Aproximación de la escala de magnitud	24

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	8
3. Resultados y discusión	31
3.1. Relocalización de los sismos	31
3.2. Función de atenuación $-\log A_0$	33
3.3. Correcciones de las estaciones	37
3.4. Comparación entre los valores de magnitud de coda (M_c) y magnitud local (M_L) . . .	38
3.5. Valor de b	39
4. Conclusiones y recomendaciones	43
A. 381 sismos reportados por el SSN	46
B. Coordenadas de la relocalización y valores de M_L para los sismos de la base de datos	57
C. Archivos de polos y ceros	64
D. Archivo de modelo de velocidades	67
Bibliografía	69

Índice de figuras

1.1. Esquema del procedimiento para estimar magnitudes.	4
1.2. Respuesta de un sismógrafo Wood-Anderson, de acuerdo a la información del fabricante.	6
1.3. Gráfica de los datos originales medidos por Richter.	6
2.1. Distribución por año de los 381 sismos que forman la base de datos.	19
2.2. Mapa de las siete estaciones permanentes instaladas en el noreste de México y los epicentros de los 381 sismos (2006-2015) que forman la base de datos.	20
2.3. Distribución de M_c y distancia epicentral de los 381 sismos que forman la base de datos	21
2.4. Secuencia del procesamiento de los registros en la base de datos.	22
2.5. Modelo de velocidades de la corteza utilizado por el SSN.	24
2.6. Registros de la componente E-W de la estación LNIG para un sismo del 12 de abril de 2015 ($M_c = 4.2$).	25
3.1. Mapa de los 381 sismos relocalizados.	32
3.2. Distribución de valores de magnitud local obtenidos en la inversión del sistema $Gm = d$ y distancias epicentrales a partir de las relocalizaciones.	34
3.3. Distribución de residuales de M_L	34
3.4. Gráfica de $-\log A_0 \pm 2\sigma$ y distribución de 2σ versus M_L	35
3.5. Comparación de $-\log A_0$ para el noreste de México y otras regiones	36
3.6. Comparación entre M_c y M_L	39
3.7. Relación Gutenberg-Richter para los 258 sismos usados en ZMAP.	42

Índice de tablas

1.1. Función clásica de calibración $-\log A_0$ para magnitudes locales M_L de acuerdo a Richter (1958)	7
1.2. Ejemplos de funciones de calibración $-\log A_0$ para determinaciones de M_L	11
2.1. Información general de las estaciones sismológicas permanentes instaladas en el NE de México.	18
2.2. Distribución de registros por estación.	19
3.1. Correcciones para las componentes horizontales de las seis estaciones.	38
3.2. Valores de a y b para cada set de datos.	41
A.1. Información sobre los 381 eventos que forman la base de datos, tal como se reporta en la página del SSN.	47
B.1. Coordenadas de la relocalización y valores de M_L para los 381 sismos de la base de datos. Se incluyen 49 sismos relocalizados en el trabajo de Gómez-Arredondo (2014)	57

Capítulo 1

Magnitud local

En Sismología medimos los sismos por medio de diferentes cantidades que se relacionan a los parámetros físicos de la fuente y una de las más usadas es la magnitud. Un valor de magnitud, además de expresar el tamaño de un sismo, se calcula con el objetivo de expresar la liberación de energía para estimar el daño potencial después de un sismo y predecir el movimiento del suelo y el riesgo sísmico (Havskov y Ottemöller, 2010). En este capítulo se presenta información general sobre los conceptos de magnitud y magnitud local, tanto la definición establecida por Richter (Richter, 1935), como las modificaciones a las que ha sido sometido el concepto para adaptarlo a las necesidades instrumentales y/o regionales, así como la justificación y objetivos de este trabajo.

1.1. El concepto de magnitud

En su forma más simple, la medición de una magnitud está basada en la amplitud que resulta de las ondas sísmicas que se registran en un sismograma, una vez que las amplitudes han sido corregidas por el decremento con la distancia debido a la dispersión geométrica y a la atenuación (Stein y Wysession, 2009). Se usa el logaritmo de la amplitud del movimiento del suelo debido a la gran variabilidad de amplitudes que generan los sismos.

Por las numerosas combinaciones de instrumentos y tipos de onda, a los sismos se les pueden asignar varios tipos de magnitud que son útiles bajo distintas condiciones. Hay en uso varias escalas de magnitud y, dependiendo de la red, la magnitud o la distancia al evento, una o más de una pueden ser usadas. Para terremotos globales ($> 20^\circ$), las escalas de magnitud toman en cuenta parámetros

establecidos internacionalmente, mientras que en distancias locales o regionales los parámetros de magnitud toman en cuenta variaciones regionales debido a las diferencias de atenuación local y dispersión geométrica (Havskov y Ottemöller, 2010). A excepción de la escala de magnitud de momento sísmico, las escalas de magnitud no representan directamente algún parámetro físico de la fuente (Kanamori *et al.*, 1993), pero pueden ser usadas para representar el tamaño relativo de los sismos y por su simplicidad pueden ser usadas para procesar en poco tiempo grandes cantidades de eventos. Además, proporcionan datos fundamentales que se incluyen en catálogos de sismos, los cuales son la base para diferentes trabajos científicos (Kim, 1998). De la magnitud también se pueden obtener otras cantidades como la aceleración del suelo, la intensidad sísmica o la tasa de recurrencia sísmica.

Todas las escalas de magnitud están basadas en el trabajo de Charles Richter (Richter, 1935), quien desarrolló una para catalogar sismos, con la idea de que la escala no necesariamente hiciera referencia a las intensidades sentidas por las personas, y también para corregir la atenuación y dispersión geométrica de ondas sísmicas causadas por ondas de corte en una región. Desde entonces, un buen número de escalas de magnitud se han desarrollado y la mayoría son similares a la de Richter en el sentido de que están basadas en el logaritmo de alguna medición de amplitud.

La forma general para todas las escalas de magnitud basadas en mediciones de las amplitudes de desplazamiento del suelo y períodos T es (Bormann, 2012):

$$M = \log(A_d/T)_{max} + \sigma(\Delta, h) + c_r + c_s \quad (1.1)$$

donde $(A_d/T)_{max}$ es el valor máximo del cociente de la amplitud de desplazamiento del suelo y el periodo, $\sigma(\Delta, h)$ es una función de calibración que depende de la distancia epicentral Δ y la profundidad de la fuente h , c_r es uno o varios términos regionales de corrección de fuente y c_s una corrección de estación relacionada con la influencia de los efectos de sitio locales en las amplitudes (lo cual depende de la estructura local de la corteza, el tipo de roca cerca de la superficie, la cobertura de suelo y/o la topografía). Para una geometría fuente-receptor dada, los eventos mayores producirán arribos de ondas de amplitudes mayores en la estación sísmica.

El término “magnitud” fue recomendado a Richter por H. O. Wood (Boore, 1989) para hacer distinción de la escala de intensidad. A diferencia de la intensidad, la magnitud usaría mediciones instrumentales del movimiento del suelo ajustadas para la distancia epicentral y la profundidad de la

fuelle. Se esperaba que la magnitud pudiera ofrecer un solo número para cuantificar el tamaño de un sismo el cual también estaba relacionado de forma aproximada a la energía sísmica liberada. Pero, como se mencionó anteriormente, tal parámetro no está relacionado directamente a algún parámetro físico de la fuente. En lugar de eso, la escala de magnitud se toma en cuenta actualmente para proporcionar rápidamente un “parámetro que puede ser usado para un primer análisis de reconocimiento de datos de sismos (catálogo) para varias investigaciones geofísicas y de ingeniería; se debe tomar especial precaución al usar la magnitud más allá de su propósito de reconocimiento” (Kanamori, 1983). En el *New Manual of Seismological Observatory* de la Asociación Internacional de Sismología y Física de la Tierra (IASPEI, por sus siglas en inglés) también se puntualiza que “no hay un solo parámetro de número disponible, el cual pueda servir como una buena estimación del tamaño de un sismo en todos sus diferentes aspectos” (Bormann, 2012).

Existen mejores conceptos para la cuantificación de la fuente de un sismo, pero la magnitud como escala relativa es ampliamente usada. Aunque su uso no descarta dudas (Hough, 2000), no solo tiene popularidad entre los sismólogos, también lo es con el público en general: por diversas razones, es muy común que cuando ocurre un terremoto la primera pregunta general es la “magnitud Richter” y la segunda es sobre la localización del epicentro.

1.2. Magnitud local de Richter

La idea detrás del concepto de magnitud de un sismo se describe de una forma simple en la figura 1.1. Cada nube encierra las mayores amplitudes de un sismo particular (Boore, 1989). Este procedimiento de graficar las amplitudes del suelo con respecto a las distancias epicentrales fue una recomendación que Wadati hizo a Richter (Richter, 1935). Claramente, el sismo 3 es mayor que el sismo 2 (y el rango de distancias para el que las amplitudes están disponibles puede o no traslaparse; el sismógrafo se saturará a distancias cercanas a un sismo grande, y la señal estará por debajo del nivel del ruido a grandes distancias de sismos pequeños). Entonces, si en promedio la atenuación con la distancia de las mayores amplitudes fuera la misma para cada evento, la distancia vertical por la cual cada nube de puntos tiene que ser movida para envolver una curva de referencia que tenga la forma de la función de atenuación promedio, con el menor residual, sería una medición cuantitativa del tamaño del sismo. Esta distancia está representada por los símbolos M_1 , M_2 y M_3 en la figura 1.1 y puede representarse

con la ecuación:

$$M = \log(A) - \log(A_0) \quad (1.2)$$

donde A es la mayor amplitud registrada en un instrumento específico y $\log(A_0)$ es la curva de referencia (ambos valores dependen de la distancia) (Boore, 1989).

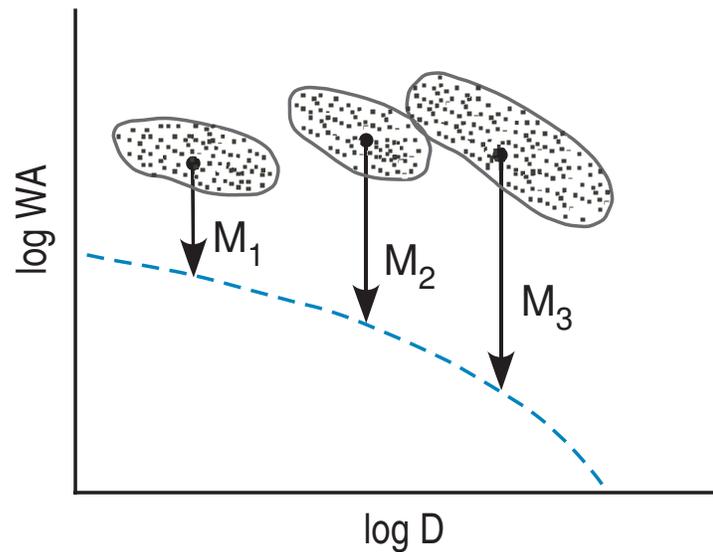


Figura 1.1: Esquema que muestra el procedimiento para estimar magnitudes. $\log WA$ es el logaritmo de la máxima amplitud registrada en un sismómetro Wood-Anderson y $\log D$ es el logaritmo de la distancia epicentral. Las áreas sombreadas indican nubes de datos de las mayores amplitudes de registros en un instrumento particular (en este caso, un instrumento de torsión Wood-Anderson) para sismos individuales, la línea punteada es la curva de referencia definida por la atenuación promedio de las ondas, y M_i son los factores de separación que se necesitan para llevar cada nube de puntos a la curva de referencia. Para evitar la posible dependencia geográfica de la curva de referencia, la magnitud M_L está definida en términos de la mayor amplitud registrada en un instrumento Wood-Anderson a una distancia particular (100 km). Las curvas de referencia para diferentes regiones geográficas deben pasar por el mismo punto en la distancia de definición. Tomado de Boore, 1989.

1.3. El sismómetro Wood-Anderson

Richter aplicó el concepto a sismos del sur de California que ocurrieron en enero de 1932, usando registros de sismógrafos Wood-Anderson. El Wood-Anderson es un sismógrafo estándar de torsión que

mide el desplazamiento en un filtro pasa-alta con una respuesta en el dominio de la frecuencia

$$WA(f) = \frac{Vf^2}{\left(f^2 - \frac{1}{T^2}\right) + 2ih\frac{f}{T}}, \quad (1.3)$$

donde f es la frecuencia, T es el eigenperiodo, h es el factor de amortiguamiento (el cociente entre el coeficiente de amortiguamiento que se tiene y el coeficiente de amortiguamiento crítico), y V es la magnificación. De acuerdo con el fabricante, para un sismógrafo Wood-Anderson estándar $f = 1.25$ Hz, $T = 0.8$ s, $h = 0.8$ y $V = 2800$ (Anderson y Wood, 1925; figura 1.2). Al usarse esta misma respuesta instrumental se garantiza uniformidad en las estimaciones de magnitud local a lo largo del mundo. El uso de los sismómetros Wood-Anderson explica la diferencia de la ecuación general para magnitudes de la ecuación 1.1, la cual incluye al periodo T y la ecuación de magnitud local de la ecuación 1.2, que considera solo las mayores amplitudes registradas que sean proporcionales al desplazamiento, pero no su periodo. Esto se debe a que los instrumentos Wood-Anderson son de periodo corto y sus grabadoras analógicas tradicionales tenían una velocidad de papel limitada, por lo que una lectura apropiada del periodo era difícil. Se asumió entonces que la máxima fase de amplitud tenía siempre el mismo periodo dominante dentro del rango de respuesta (Bormann, 2012). En el caso de eventos locales, esta fase es representada generalmente por ondas corticales de la capa granítica. Pueden ser son ondas de cuerpo Sg, ondas de superficie Lg que arriban después de las Sg y a menudo presentan las mayores amplitudes u ondas Rg que se presentan debido a eventos muy superficiales a distancias de algunos cientos de kilómetros.

1.4. Definición original de magnitud local

Entonces, graficando el logaritmo de las trazas de amplitud mayores de estos registros, como función de la distancia epicentral, Richter determinó la forma de la curva de referencia para la corrección de las amplitudes medidas a una distancia común. Encontró que el logaritmo de las amplitudes máximas decrecía con la distancia, en curvas más o menos paralelas que representaban sismos de diferente tamaño (figura 1.3). Por supuesto, estos valores son válidos solo para el sur de California.

Richter inicialmente midió amplitudes de cero al pico. Después cambió (Gutenberg y Richter, 1956) a la mitad de pico a valle. Empíricamente, ambas prácticas de lectura llevan a los mismos valores de magnitud (0.1 unidades) en diversas circunstancias (Rezapour y Rezaei, 2011). Fue también en 1956

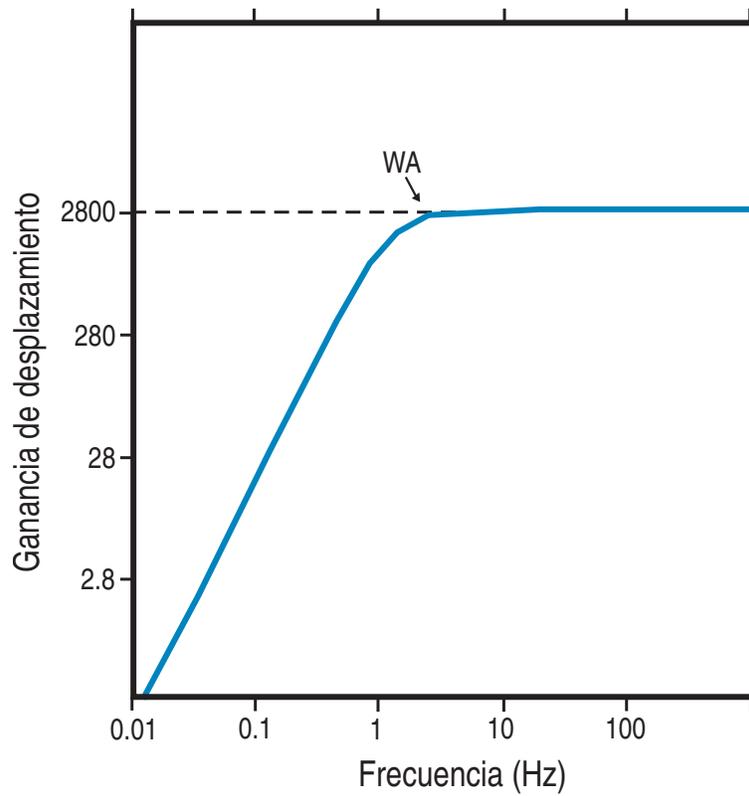


Figura 1.2: Respuesta de un sismógrafo Wood-Anderson, de acuerdo a la información del fabricante. Tomada de [Bormann, 2012](#).

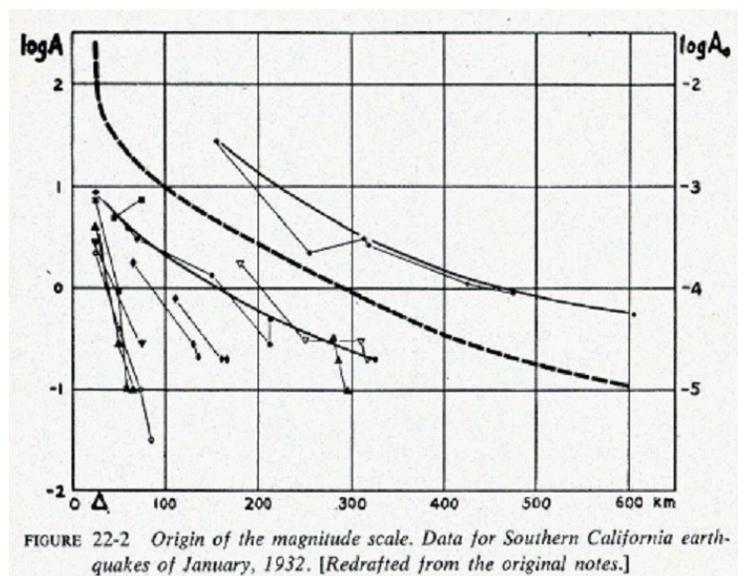


Figura 1.3: Gráfica de los datos originales medidos por Richter. Figura tomada de [Richter \(1958\)](#).

cuando Gutenberg y Richter introdujeron el término “ M_L ” para hacer distinción entre magnitud local y los otros tipos de magnitud (Boore, 1989).

La normalización que eligió Richter para la curva corresponde a la definición formal de M_L , tal como escribió (Richter, 1935, pág. 7): “La magnitud de cualquier sacudida se toma como el logaritmo de la máxima traza de amplitud, expresada en micras, con la cual el sismómetro de torsión estándar de período corto ($T_0 = 0.8$ segundos, $V = 2800$, $h = 0.8$) registraría esa sacudida a una distancia epicentral de 100 kilómetros”.

En dicha definición de magnitud local es importante el requisito que se impone acerca de un sismo de referencia. Richter propuso un sismo de referencia de $M_L = 3$, el cual produce una amplitud de 1 mm en un sismógrafo Wood-Anderson localizado a 100 km del epicentro ($-\log A_0 = 3$).

Las correcciones de atenuación para distancias epicentrales que Richter mostró en su primer trabajo sobre magnitud se aplican entre 30 y 600 km. Gutenberg y Richter (1942) estudiaron datos en instrumentos de ganancia baja y publicaron correcciones de atenuación para el rango de 0 a 25 km. Los valores de corrección tabulados se volvieron a imprimir sin cambios esenciales en el libro de texto de Richter de 1958, en el cual denomina “ $-\log A_0$ ” al factor de corrección (tabla 1.1).

Tabla 1.1: Función clásica de calibración $-\log A_0$ para magnitudes locales M_L de acuerdo a Richter (1958). A_0 son las amplitudes en mm de las trazas de un sismo de $M_L = 0$, registradas en un sismómetro de torsión Wood-Anderson estándar.

Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$
0	1.4	90	3.0	260	4.6
10	1.5	100	3.0	280	4.6
20	1.7	120	3.1	300	4.7
30	2.1	140	3.2	320	4.7
40	2.4	160	3.3	340	4.8
50	2.6	180	3.4	360	4.8
60	2.8	200	3.5	380	4.9
70	2.8	220	3.65	400	4.9
80	2.9	240	3.7	420	4.9

1.5. Modificaciones a la definición original de magnitud local

Con el tiempo, empezó a notarse que las magnitudes estaban siendo subestimadas para sismos cercanos y sobrestimadas para sismos lejanos. Definir la escala M_L a 100 km puede llevar a comparaciones erróneas del tamaño de sismos si la atenuación de las ondas sísmicas dentro de los 100 km es fuertemente dependiente en la región. Esto se demostró en varios estudios para California (Luco, 1982; Jennings y Kanamori, 1983; Bakun y Joyner, 1984; Hutton y Boore, 1987) y se debe a que Gutenberg y Richter (1942) usaron valores incorrectos de dispersión geométrica y profundidad focal promedio en su cálculo de $-\log A_0$. De acuerdo a Hutton y Boore (1987), las correcciones de distancia desarrolladas por Richter para sismos locales ($\Delta < 30$ km) son incorrectas. Bakun y Joyner (1984) también habían llegado a esta conclusión para eventos débiles registrados en el centro de California, a distancias menores a 30 km. Esto lleva a que las estimaciones de magnitud para estaciones cercanas sean menores que las de estaciones lejanas. Por lo tanto, Hutton y Boore (1987) propusieron que las escalas de magnitud local se redefinieran de tal forma que $M_L = 3$ corresponda a 10 mm de movimiento en el registro Wood-Anderson a una distancia hipocentral de 17 km.

Junto con lo anterior, la especificación del instrumento Wood-Anderson hacía limitado el uso de la escala para determinar magnitudes de sismos muy grandes o pequeños, o para áreas con instrumentos fuera de ese rango de registro. Los instrumentos Wood-Anderson dejaron de ser utilizados por la mayoría de los observatorios desde hace un par de décadas (Lolli *et al.*, 2015), pero con la llegada de los avances en los registros digitales, se hizo posible simular la respuesta de un sismómetro Wood-Anderson estándar y superar estas limitaciones. Aunque estrictamente hablando las componentes horizontales deben ser usadas a la hora de medir la amplitud, en la práctica a menudo se usa la componente vertical (Havskov y Ottemöller, 2010).

Entre los primeros en construir registros Wood-Anderson sintéticos se encuentran Bakun y Lindh (1977), que calcularon magnitudes para sismos pequeños (hasta $M_L = 0.1$). Después, Kanamori y Jennings (1978) usaron registros de acelerómetros al generar sismogramas Wood-Anderson sintéticos para sismos moderados a fuertes, en distancias para las cuales un instrumento Wood-Anderson estándar se saldría de escala. Luego, Bakun *et al.* (1978) llevaron a cabo una comparación directa entre ambos tipos de sismogramas, encontrando que las diferencias en M_L que resultan del uso de trazas Wood-Anderson sintéticas y las reales no son significativas. Años después, Uhrhammer y Collins (1990) comprobarían que la diferencia promedio de las amplitudes máximas de las trazas no es significativamente distinta

de cero, y recomendarían un cambio en la función de transferencia Wood-Anderson clásica hacia los valores correctos ($V = 2080 \pm 60$, $h = 0.7$), aunque en la mayoría de los estudios sobre el tema se toman en cuenta los mismos valores que usó Richter, para garantizar una uniformidad en las magnitudes locales.

Esta práctica de convolucionar la señal registrada con la respuesta de un sismógrafo de torsión Wood-Anderson estándar es un proceso simple que ha sido usado por muchos investigadores para determinar escalas de magnitud local en diferentes partes del mundo (por ejemplo, [Alsaker et al., 1991](#); [Kanamori et al., 1993](#); [Savage y Anderson, 1995](#); [Uhrhammer et al., 1996](#); [Langston et al., 1998](#); [Vidal y Munguía, 1999](#); [Kang et al., 2000](#); [Del Pezzo y Petrosino, 2001](#); [Ortega y Quintanar, 2005](#); [González et al., 2006](#); [Askari et al., 2009](#); [Rezapour y Rezaei, 2011](#); [Ottemöller y Sargeant, 2013](#); [Hafiez et al., 2014](#); [Li et al., 2015](#)).

1.6. Curva de atenuación $-\log A_0$

Para que las magnitudes M_L sean consistentes, la atenuación de ondas sísmicas dentro de cada región debe ser determinada, y las relaciones de magnitud para diferentes regiones deben ser relacionadas en una distancia de referencia cercana a la fuente. La escala M_L original para California fue definida para sismos poco profundos y la corrección de distancia usaba la distancia epicentral, pero como la amplitud máxima usualmente ocurre en las ondas S (y no en las ondas de superficie), no hay razón para limitar la escala M_L a sismos someros, ya que solo es cuestión de reemplazar a la distancia epicentral con la hipocentral. Además, para garantizar una uniformidad, las condiciones de sitio locales, que llevan a la amplificación o deamplificación de los movimientos del suelo medidos, son comúnmente tomadas en términos de correcciones de estación. Las correcciones de estación varían y se correlacionan ampliamente con la geología regional.

Siguiendo a [Havskov y Ottemöller \(2010\)](#), para un sismo local, la amplitud A de una onda S como función de la distancia hipocentral r se puede expresar como

$$A(r) = A_0 r^{-\beta} e^{\frac{-\pi fr}{vQ}}, \quad (1.4)$$

donde A_0 es la amplitud inicial a la distancia 1, β es la dispersión geométrica (1 para ondas de cuerpo y

0.5 para ondas de superficie), f es la frecuencia, v es la velocidad de onda S y Q el factor de calidad inversamente proporcional a la atenuación anelástica. Aplicando el logaritmo se tiene

$$\log(A(r)) = -\beta \log(r) - 0.43 \frac{\pi f r}{v Q} + \log(A_0). \quad (1.5)$$

Se puede ver entonces que el término de atenuación con respecto a la distancia es

$$Q_d(\Delta) = -\beta \log(r) - 0.43 \frac{\pi f r}{v Q}. \quad (1.6)$$

Entonces, asumiendo una f constante, la escala M_L se puede escribir como

$$M_L = \log(A) + a \log(r) + br + c, \quad (1.7)$$

donde a , b y c son constantes que representan la dispersión geométrica, atenuación y el nivel base, respectivamente. Se espera que el valor de a sea cercano a 1 asumiendo la dispersión de ondas de cuerpo y que el de b sea pequeño debido a la atenuación anelástica ($b=0.004$ para $Q=100$, $f=1$, y $v=3.5$ km/s) y se ha comprobado para la mayoría de las escalas en otras regiones (tabla 1.2). El parámetro c puede ajustarse después para fijar la escala con la definición original. De cualquier forma, es de esperarse que los parámetros a , b y c presenten variaciones regionales y por lo tanto deben ajustarse a las condiciones locales. Al determinar las funciones de calibración de M_L para otras regiones, primero debe obtenerse el término de atenuación de amplitud y después esta curva debe ser acomodada a la definición original de M_L (≤ 100 km).

En general, en la literatura se consideran dos tipos de aproximaciones para la curva de atenuación $\log A_0$: una paramétrica (por ejemplo, [Bakun y Joyner, 1984](#); [Alsaker et al., 1991](#); [Keir et al., 2006](#); [González et al., 2006](#)) o una no-paramétrica ([Richter, 1935](#); [Savage y Anderson, 1995](#); [Kim, 1998](#); [Kim y Park, 2005](#)), dependiendo de la disponibilidad en la región de valores de dispersión geométrica y atenuación. También, hay quien ha llevado a cabo ambas aproximaciones, para después hacer una comparación de los resultados de la función ([Spallarossa et al., 2002](#); [Baumbach et al., 2003](#); [Bragato y Tento, 2005](#); [Ortega y Quintanar, 2005](#)). Las mayores ventajas de la forma paramétrica de la curva de atenuación son que toma en cuenta expresiones simples de dispersión geométrica y atenuación, y que se representa con pocos coeficientes; además, asume una dependencia de la función $\log A_0$ de la distancia, y trata de acomodar la función a los datos, esto facilita una estimación directa de la magnitud local usando una sola ecuación para todas las distancias hipocentrales. Por otro lado,

Tabla 1.2: Ejemplos de funciones de calibración $-\log A_0$ para determinaciones de M_L , presentadas por región. Δ es la distancia epicentral, R es la distancia hipocentral (ambas en km) y T es el periodo. n va de 1 a 6 y z es la escala de transformación para las distancias epicentrales, ambas tienen que ver con el tipo de polinomial de Chebychev que se usó para llegar a los resultados del trabajo (los detalles se pueden revisar en [Uhrhammer et al., 2011](#)). Modificada de [Bormann \(2012\)](#).

Región	$-\log A_0$	Componente	Rango (km)	Autor
Norteamérica				
California (Estados Unidos)	$1.11 \log R + 0.00189R + 0.591 + TP(n) \times T(n, z) + S$	Horizontal	$8 \leq R \leq 500$	Uhrhammer et al. (2011)
Sur de California (Estados Unidos)	$1.110 \log(R/100) + 0.00189(R - 100) + 3$	Horizontal	$10 \leq R \leq 700$	Hutton y Boore (1987)
Baja California (México)	$1.1319 \log(R/100) + 0.0017(R - 100) + 3$	Horizontal	$0 \leq R \leq 400$	Vidal y Munguía (1999)
Utah (Estados Unidos)	$-\log A_0(\text{Richter, 1958}) + S$	Horizontal (media aritmética)	$\Delta \leq 600$	Pechmann et al. (2007)
Centro de Estados Unidos	$0.939 \log(R/100) - 0.000276(R - 100) + 3.0$	Horizontal	$0 \leq R \leq 1400$	Miao y Langston (2007)
Este de Norteamérica	$1.55 \log \Delta - 0.22$	Horizontal	$100 \leq \Delta \leq 800$	Kim (1998)
	$1.45 \log \Delta - 0.11$	Vertical	$100 \leq \Delta \leq 800$	
Valle de México	$0.48 \log(R/100) - 0.0018(R - 100) - 3$	Vertical	$0 \leq R \leq 200$	Ortega y Quintanar (2005)
Europa				
Noruega/Fenoscandia	$0.91 \log R + 0.00087R + 1.010$	Vertical	$0 \leq R \leq 1500$	Alsaker et al. (1991)
Europa central	$0.83 \log R + (0.0017/T)(R - 100) + 1.41$	Vertical	$100 \leq \Delta \leq 650$	Wahlström y Strauch (1984)
Suroeste de Alemania (Baden-Württemberg)	$1.11 \log R + 0.95R/1000 + 0.69$	Vertical	$10 \leq R \leq 1000$	Stange (2006)
Norte de Italia	$\log(R/100) + 0.0054(R - 100) + 3$	Horizontal	$10 \leq R \leq 310$	Bindi et al. (2005)
	$\log(R/100) + 0.0041(R - 100) + 3$	Vertical		
Albania	$1.6627 \log \Delta + 0.0008\Delta - 0.433$	Horizontal	$10 \leq \Delta \leq 600$	Muço y Minga (1991)
Grecia	$1.58 \log(R/100) + 3$; para $M_L \leq 3.7$	Horizontal	$100 \leq \Delta \leq 800$	Kiratzi y Papazachos (1984)
	$1.58 \log(R/100) + 3$; para $M_L > 3.7$			
Medio Oriente				
Noroeste de Turquía	$\log(R/17) + 0.00960(R - 17) + 2 - S$	Horizontal	$5 \leq R \leq 62$	Baumbach et al. (2003)
	$\log(R/62) + 0.00960(R - 62) + 2.95 - S$		$62 \leq R \leq 110$	
Norte de Irán	$1.1725 \log R - 0.0021R - 0.4450$	Horizontal	$40 \leq R \leq 700$	Askari et al. (2009)
África				
Etiopía	$1.196997 \log(R/17) + 0.001066(R - 17) + 2$	Horizontal	$5 \leq R \leq 800$	Keir et al. (2006)
Tanzania	$0.7761 \log R + 0.000902(R - 17) + 2$	Horizontal	$0 \leq R \leq 1000$	Langston et al. (1998)
Sudáfrica	$1.149 \log R + 0.00063R + 2.04 - S$	Vertical	$10 \leq R \leq 1000$	Saunders et al. (2013)
Australia				
Sur de Australia	$1.10 \log \Delta + 0.0013\Delta + 0.7$	Vertical	$40 \leq \Delta \leq 700$	Greenhalgh y Singh (1986)

la expresión no-paramétrica no asume una forma para $\log A_0$, de manera que la forma de la curva de atenuación está determinada por los datos y representa mejor la complejidad de la corteza y el manto superior (Keir *et al.*, 2006), y es más apropiada cuando el mecanismo de pérdida de señal no es comprendido del todo (Savage y Anderson, 1995) o cuando las diferencias en dispersión geométrica son esperadas en el rango de distancias considerado (es decir, debido a predominancia de fases Sg o Lg).

1.7. Magnitud local en México

La sismicidad en el noreste de México, concentrada en mayor parte en el centro del estado de Nuevo León, ha estado siendo estudiada principalmente en la última década (por ejemplo, Quintanilla-López, 2008; Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008; Montalvo-Arrieta *et al.*, 2011; Ramos-Zúñiga *et al.*, 2012; Gómez-Arredondo *et al.*, 2016). Recientemente se ha propuesto que una parte de esta sismicidad puede ser debida a pequeños movimientos del bloque de basamento de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo, funcionando como bloques a grandes escalas (Gómez-Arredondo *et al.*, 2016) y también a procesos de reactivación de fallas antiguas o al llenado repentino de la presa El Cuchillo (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2015), dependiendo de la región en la que ocurre.

De cualquier forma, en la región no se han realizado trabajos previos sobre escalas de magnitud. En otras partes del país, Munguía y Brune (1984) estudiaron magnitudes locales y la amplificación de sedimentos a distancias cortas de sismos en la región del norte de Baja California y el sur de California. Luego, Vidal y Munguía (1999) calcularon funciones de atenuación también en el norte de Baja California, encontrando resultados que coincidían o se diferenciaban de los del sur de California, dependiendo del rango de distancias. También se han realizado trabajos más recientes como el de Ortega y Quintanar (2005), llevado a cabo en el Valle de México, donde se observó que los valores de magnitud de coda subestimaban los niveles de excitación de los eventos locales o el de González *et al.* (2006) en la región de La Paz-Los Cabos, en Baja California Sur, en el que se obtuvieron resultados muy parecidos a los del sur de California.

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) hace uso de la magnitud de coda o duración (M_c) para asignar los valores de magnitud a los sismos en el noreste del país, tomando en cuenta parámetros que son generales para todo el territorio mexicano (Servicio Sismológico Nacional, archivo electrónico disponible en el sitio web www.ssn.unam.mx). Además de la coda, en algunos casos también se utiliza

la amplitud máxima, calibrada con la magnitud de momento sísmico (Espíndola-Castro, 2017, comunicación personal). El uso de la magnitud de coda es conveniente por la prontitud con que se obtiene un valor de magnitud para asignar a los sismos. Por otro lado, en el noroeste del país, la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) reporta magnitudes locales, tomando en cuenta parámetros que se obtuvieron para esa región, lo cual también es común en otros países del mundo como Chile, Puerto Rico, Corea, Turquía, agencias locales de Canadá y Estados Unidos y sobre todo en países europeos.

1.8. Magnitud local en la actualidad

Actualmente la recomendación de la IASPEI (Bormann, 2012) como estándar para sismos corticales en regiones con propiedades de atenuación similares a las del sur de California es

$$M_L = \log(A) + 1.11 \log(R) + 0.00189(R) - 2.09, \quad (1.8)$$

donde A es la amplitud de la máxima traza en nm, medida en la componente horizontal filtrada de forma que la respuesta del sismógrafo replique la de un Wood-Anderson, pero con magnificación estática de 1, y R es la distancia hipocentral en km, típicamente menos de 1000 km. Para las estaciones que contienen dos componentes horizontales, las amplitudes se miden independientemente, y cada amplitud se usa de forma individual. Esta ecuación es una extensión de la de Hutton y Boore (1987).

De la misma forma, para otras regiones del mundo con distintas estructuras de velocidad y atenuación, edad y composición de la corteza, condiciones de flujo de calor y distribución de profundidades, y para la medición de magnitudes con sismógrafos de componente vertical, la ecuación estándar es de la forma

$$M_L = \log(A) + C(R) + D, \quad (1.9)$$

donde A y R se definen igual que en la ecuación para California, excepto que A puede ser medida en un instrumento de componente vertical, y donde $C(R)$ y D han sido calibradas para ajustarse a la distinta atenuación regional y para ajustar cualquier diferencia sistemática entre las amplitudes medidas en sismógrafos horizontales y las medidas en sismógrafos verticales.

1.9. Objetivos de este trabajo

Los objetivos principales de este trabajo son determinar una escala de magnitud local y una ecuación empírica que relacione M_L con la escala de magnitud de duración (M_c), esto incluye un rango de magnitudes y distancias en los que la escala sea aplicable. Además de agregar al catálogo de sismicidad valores de magnitud local, también se pretende determinar el tipo de ambiente sismotectónico al revisar las características de atenuación de ondas sísmicas, comparar los resultados con los de otras regiones activas en las cuales también se han desarrollado escalas de magnitud local y por último revisar la recurrencia de sismos moderados a partir de los valores de M_L que resulten de una relación Gutenberg-Richter.

1.10. Justificación de este trabajo

Las escalas de magnitud representan los datos fundamentales sobre el tamaño del sismo (aunque no den información física de la fuente) además de ser las que se incluyen en los catálogos de terremotos, los cuales son la base para una gran variedad de proyectos de investigación científica sobre peligros sísmicos. Un catálogo de sismos calibrado con base en M_L es de gran importancia para los estudios de peligro sísmico, tal como se indica en el *New Manual of Seismological Observatory Practice* (Bormann, 2012) de la IASPEI, y son los catálogos los que son sujetos a análisis estadístico al evaluar peligros en alguna región.

Además de esta utilidad obvia, M_L ha sido usada en predicciones de sacudida de suelo como función de distancia y magnitud; también ha sido usada en la estimación de energía y momento sísmico (Boore, 1989) y se sabe que el uso de observaciones locales permite la caracterización de sismos de magnitudes más pequeñas y que ocurren más frecuentemente, lo cual puede servir a la hora de calcular tasas de recurrencia de sismos o caracterizar fallas locales activas.

De la misma forma, la magnitud local tiene una relevancia directa en el campo de la sismología de movimientos fuertes y la ingeniería sísmica ya que se desarrolló utilizando registros de amplitudes de la ventana de frecuencias (1–10 Hz, Bakun y Joyner, 1984) que interesa directamente a las normas para construcción, los periodos naturales de vibración de estructuras y para cualquier prueba dinámica o estática de simulación de estructuras críticas. Por lo tanto, la curva de atenuación que se incluye en la

escala de magnitud tiene impacto en el trabajo de ingenieros, arquitectos, agencias reguladoras, planificadores urbanos, y es de gran importancia en el problema de la mitigación de los daños producidos por terremotos en los estudios de riesgo sísmico, zonación sísmica y peligro geológico.

M_L también puede ser usada como magnitud de calibración a la que pueden referirse otras escalas de magnitud regional (Espinosa, 1989) o puede relacionarse con otras escalas (Bakun, 1984; Tobyáš y Mittag, 1991; Baba *et al.*, 2000; Deichmann, 2006). A pesar de que la magnitud de momento (M_w) es la mejor medición al determinar el tamaño de un sismo (Kanamori, 1977; Pechmann *et al.*, 2007), la carencia de una cobertura amplia de estaciones junto con el carácter leve de los sismos en el área (en general $M_c < 3.5$) hacen imposible el reportar M_w de manera rutinaria para el noreste de México.

El SSN ha reportado más de 400 sismos ($1.9 \leq M_c \leq 4.5$) desde 2006, año en que se instaló la estación LNIG, los cuales han sido ubicados, en mayor parte, en el centro-sur del estado de Nuevo León. Algunos de estos sismos han sido sentidos por sectores de la población en China, General Terán, Monterrey y su área metropolitana, así como en otros municipios de la región citrícola de Nuevo León y diversos puntos del estado de Coahuila, principalmente en Saltillo. En promedio se han registrado tres sismos con $M_c \geq 4$ por año en el noreste de México (dentro del período 2006-2015) y aunque el sismo más grande que se ha reportado en la zona es de $M_c = 4.5$, se tiene registro que en la región han ocurrido sismos de $M_w = 5.1$ (Ramos-Zúñiga *et al.*, 2012).

La intención de desarrollar una escala de magnitud local surge a partir de la gran variabilidad de la estructura de velocidades y atenuación de la corteza de la Tierra, que hace imposible desarrollar una función única y estandarizada internacionalmente para eventos locales. La magnitud de coda que se usa en la región es la magnitud más simple para usar en sismos locales, y se determina de forma rápida e independiente de la calibración del instrumento, aunque la variación en las estimaciones de cada estación es a menudo mayor, en comparación con otras escalas basadas en mediciones de amplitud, como M_L . Además, las magnitudes de coda dependen críticamente de la correcta selección del largo de la coda, que a su vez depende de cómo el analista elige el final de la señal. La práctica manual más común consiste en seleccionar el final del evento cuando el nivel de señal es similar al nivel de ruido y en general se usan filtros y rangos de amplitud fijos (Havskov y Ottemöller, 2010).

Siendo el noreste de México una región sísmicamente activa, donde se ha documentado actividad sísmica de manera reciente y en la cual no se conoce cómo es la atenuación de ondas sísmicas, se

vuelve de importancia el definir una escala de magnitud local que tome en cuenta las características sismotectónicas de la región, buscando que pueda relacionarse con la magnitud de coda o que sea una mejor alternativa a esta y sea aplicada tanto a los sismos previos como a los próximos, de forma que contribuya en parte a la mejora y éxito de los análisis de peligro sísmico. En este trabajo se presenta la primera escala de magnitud desarrollada para el noreste de México, lo cual incluye también la primera revisión sobre la atenuación en la región. Los resultados de este trabajo tienen relevancia al tomar en cuenta que la sismicidad ocurrida está localizada cerca de los principales centros urbanos del noreste de México.

Capítulo 2

Base de datos y metodología

En la primera parte de este capítulo se presentan los criterios de selección de las estaciones y los registros que forman la base de datos de 381 sismos usada en este trabajo. Luego se presentan los pasos del procesamiento realizado en SAC (*Seismic Analysis Code*, Helffrich *et al.*, 2013) versión 101.5c y SEISAN (*Seismic Analysis*; Havskov y Ottemöller, 1999) 10.3, donde se incluye la relocalización de los eventos y la convolución de los registros con la respuesta de un sismómetro Wood-Anderson. Por último, se describe el proceso para obtener la curva de corrección de atenuación $-\log A_0$ haciendo uso de una descomposición en valores singulares para obtener los parámetros de dispersión geométrica n , atenuación anelástica K , magnitud local M_L y correcciones de las estaciones.

2.1. Selección de los registros de la base de datos

Al hablar del noreste de México se puede divagar dependiendo del contexto o de las intenciones. Para delimitar el área de estudio de este trabajo, se optó por usar registros de sismos con epicentros reportados por el SSN entre las longitudes -97 y -103 y las latitudes 22 y 29, tomando en consideración que las fases P y S se distinguieran del ruido de fondo en cada registro. La elección de esas coordenadas se basa en que esta área incluye un gran porcentaje de la sismicidad reportada en la región e incluye también el territorio de los estados de Tamaulipas, Nuevo León y San Luis Potosí, así como gran parte de Coahuila y Zacatecas.

Hay siete estaciones sismológicas permanentes instaladas en el noreste de México, las cuales forman parte de la red de banda ancha del SSN: ZAIG, LNIG, MNIG, AAIG, GTIG, RPIG y MCIG

Tabla 2.1: Información general de las estaciones sismológicas permanentes instaladas en el NE de México. *La estación MNIG contó con un sensor CMG-40TD hasta el 12 de noviembre de 2013 y la estación RPIG con un PBB-2005 hasta el 6 de septiembre de 2015.

Clave de la estación	Ubicación	Inicio de operación	Latitud	Longitud	Tipo de sensor
ZAIG	Zacatecas, Zacatecas	08/02/1997	22.7692	102.567	STS2
LNIG	Linares, N. L.	19/01/2006	24.898	-99.466	STS2
MNIG	Monterrey, N. L.	02/12/2012	25.609293	-100.285133	CMG-3T*
AAIG	Aguascalientes, Aguascalientes	04/04/2014	21.968457	-102.3802	PBB-2005
RPIG	Río Verde, S. L. P.	14/05/2014	21.88492	-99.982753	Trillium 240*
GTIG	Gómez Farías, Tamaulipas	19/05/2014	23.066908	-99.169127	PBB-2005
MCIG	Melchor de Múzquiz, Coahuila	08/02/2015	27.877093	-101.483627	Trillium 240

(tabla 2.1, véase también la figura 2.2). En el periodo que comprende desde la fecha de instalación de LNIG hasta el final del año 2015, el SSN ha reportado 409 sismos en la región, con un rango de magnitud de $1.9 \leq M_c \leq 4.5$ y de distancia epicentral de $6.42 \leq \Delta \leq 700.98$ km. Estos sismos se concentran principalmente en la región centro-sur del estado de Nuevo León.

Los registros de velocidad de estos sismos fueron descargados de la base de datos en línea del SSN, con extensión .sac, a partir de la fecha y hora del reporte preliminar. Una vez que se realizó la selección manual de cada uno de los registros, tomando en cuenta las fases P y S y la distancia epicentral, se formó la base de datos con 381 sismos (figura 2.1 y 2.2) de un rango de magnitud de $1.9 \leq M_c \leq 4.5$ y de distancia epicentral de $8.6 \leq \Delta \leq 561.61$ km, con una mayor representación alrededor de 100 km (figura 2.3). Las consideraciones principales fueron que los eventos se distinguieran del ruido de fondo de la estación y la claridad de las fases. En el caso de los 28 sismos descartados, no es notable un cambio en la amplitud o frecuencia en las trazas del registro que diera indicio de la utilidad del registro, tomando en cuenta que en un proceso posterior es necesario medir la amplitud máxima. La lista completa de parámetros (fecha, hora, epicentro, profundidad, M_c y zona) reportados por el SSN se puede revisar en el apéndice A.

Se cuenta entonces con un total de 584 registros de las componentes verticales y 1163 de las componentes horizontales, con base en información de seis de las siete estaciones y debido a que cada estación cuenta con una cantidad distinta de sismos registrados. LNIG es la estación con más representación teniendo un total de 374 sismos, cada uno con dos registros de las componentes horizontales, lo que resulta en un total de 748 registros de estas componentes; mientras que AAIG tiene menor representación ya que solo cuenta con 7 sismos, es decir, 14 registros en las componentes horizontales (ver tabla 2.2). No se recuperaron registros de la estación ZAIG en los que las fases pudieran distinguirse del

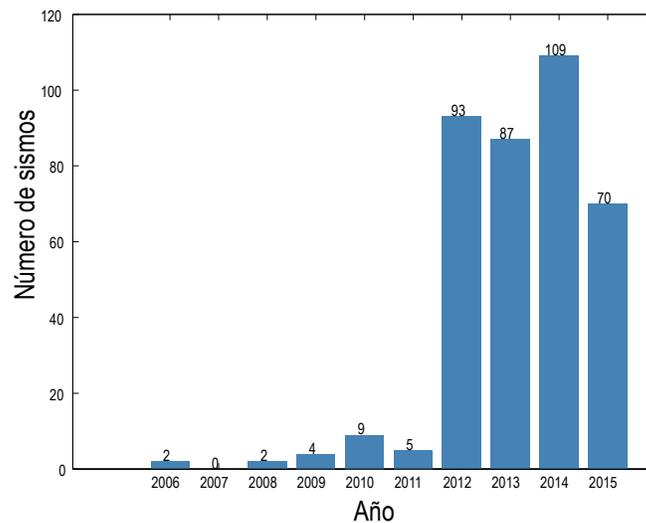


Figura 2.1: Distribución por año de los 381 sismos que forman la base de datos.

Tabla 2.2: Distribución de registros por estación.

Clave de estación	Cantidad de sismos registrados y registros en la componente vertical	Registros en componentes N y E
LNIG	374	748
MNIG	136	272
GTIG	35	70
MCIG	19	37
RPIG	11	22
AAIG	7	14
Total	582	1163

ruido de fondo, debido muy probablemente a la distancia entre la mayoría de los epicentros y la estación.

2.2. Relocalización de los sismos

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, la mayor parte del procesamiento de los registros se llevó a cabo usando comandos de SAC (Seismic Analysis Code, [Helffrich et al., 2013](#)) versión 101.5c, a excepción de la localización de los sismos, la cual se realizó en SEISAN (Seismic Analysis; [Havskov y Ottemöller, 1999](#)) 10.3. La secuencia del procesado se puede observar en la figura 2.4, donde se ilustran las etapas principales.

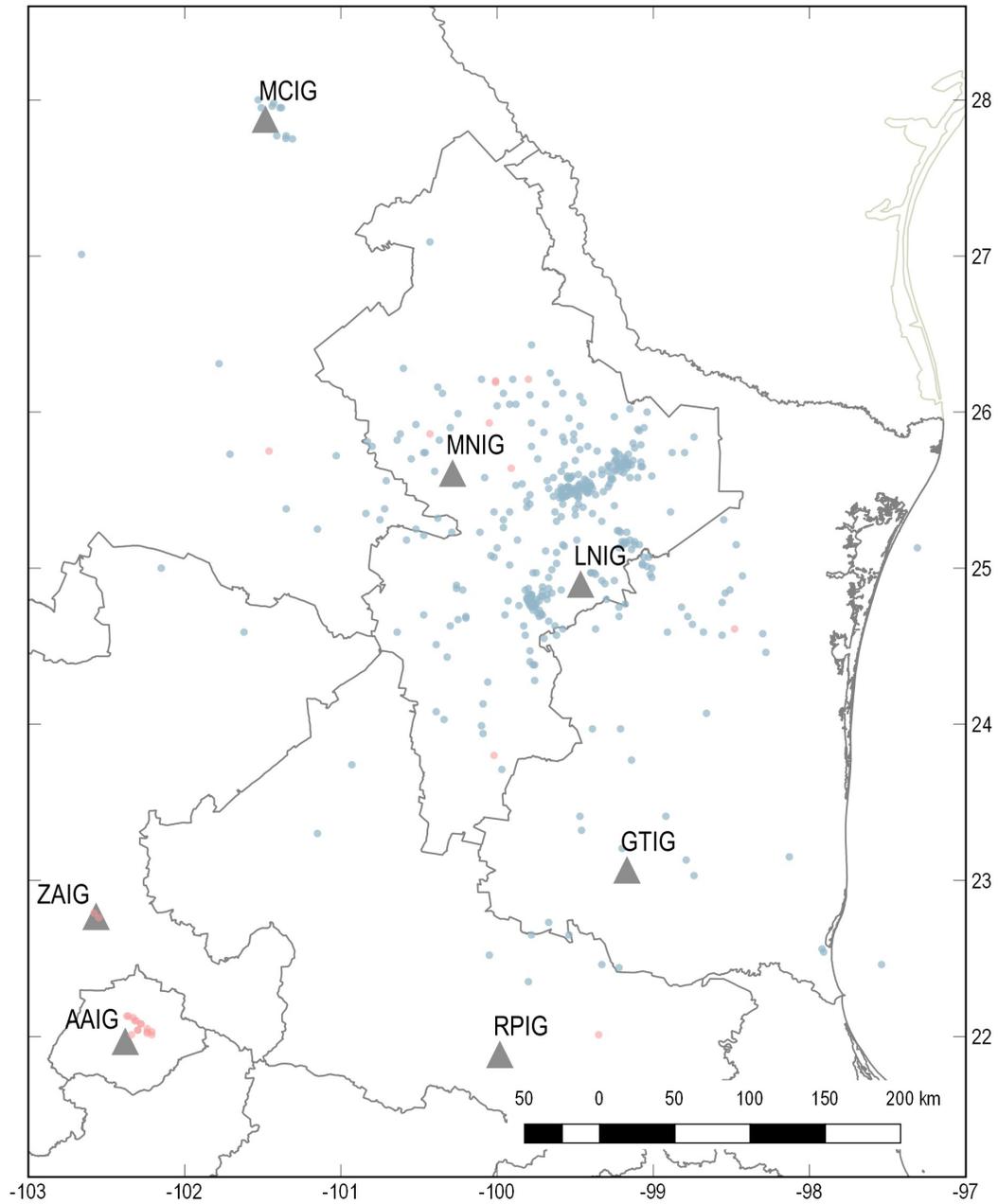


Figura 2.2: Mapa de las siete estaciones permanentes instaladas en el noreste de México y los epicentros de los 381 sismos (2006-2015) que forman la base de datos. Se muestran en color rosa los 28 sismos que quedaron fuera de la base de datos.

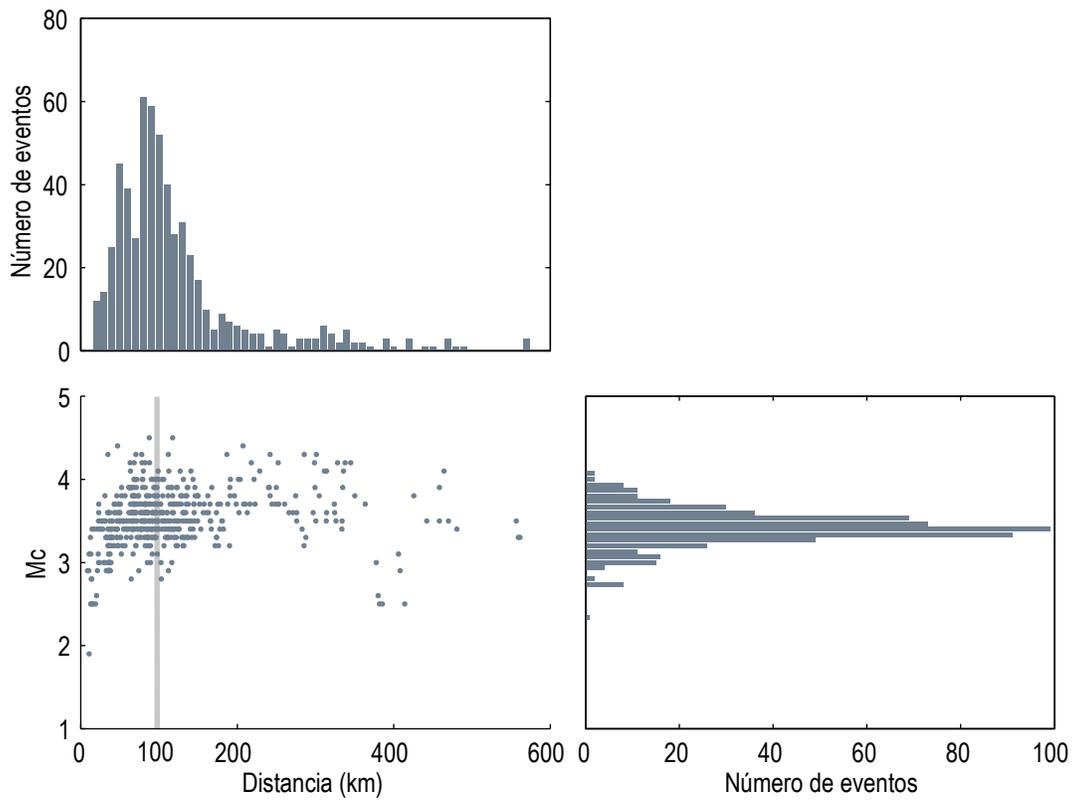


Figura 2.3: Distribución de M_c y distancia epicentral de los 381 sismos que forman la base de datos

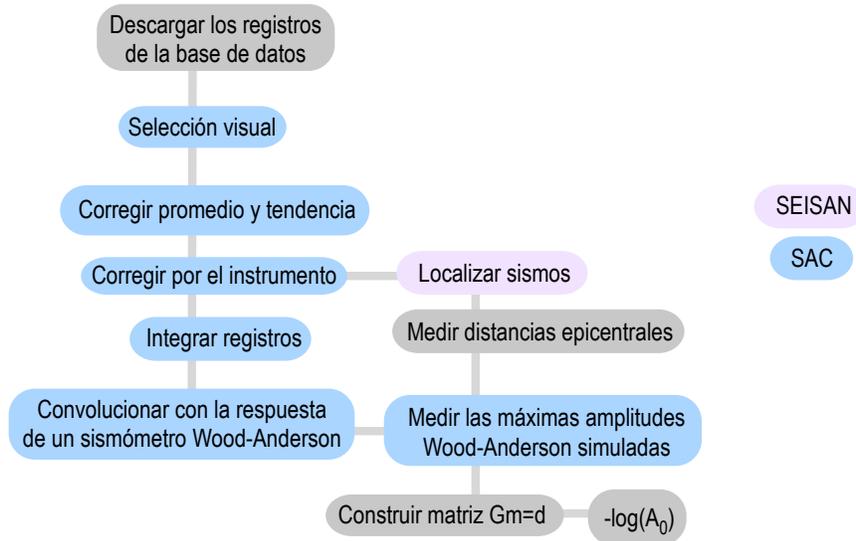


Figura 2.4: Se ilustra la secuencia del procesamiento de los registros.

La primera etapa, para llegar a los 381 sismos de los 409 reportados, fue la selección visual de los registros. En esta etapa no es necesario aplicar algún tipo de filtrado. Posteriormente, se corrigió el promedio y tendencia de los registros y se observó una característica remarcable de los registros de la estación MNIG: el tiempo del arribo de P se encuentra de 6 a 20 s antes del tiempo reportado por el SSN para todos los sismos en la base de datos. Esta anomalía ya había sido observada en el trabajo de [Gómez-Arredondo \(2014\)](#), y se atribuyó a un mal funcionamiento del sistema de posicionamiento global de la estación o a un error en la conversión de los datos. El desfase en tiempo de alguna estación es un inconveniente que se presenta ocasionalmente en una red sismológica ([Havskov y Ottemöller, 2010](#)), pero los registros de la estación MNIG son útiles en este trabajo porque se les asigna un peso insignificante en la localización y en la etapa de medición de amplitudes se hace uso de las lecturas de las máximas amplitudes de los sismogramas simulados Wood-Anderson, en lo cual el tiempo del registro de la estación no tiene influencia.

La señal de un sismograma es una convolución de la fuente sísmica, la estructura de la Tierra y el sistema de registro. Por esta razón, con el propósito de que los registros representen solamente el movimiento del suelo, el siguiente paso es corregirlos con la respuesta del instrumento por medio de una deconvolución en SAC. Se deben conocer las características de los sismómetros instalados en cada

estación, ya que cada uno tiene una respuesta distinta. En este trabajo se han usado archivos de polos y ceros para cada estación, los cuales fueron proporcionados por el SSN y se encuentran en el apéndice C (debido a que cuentan con sensores PBB-2005, para los registros de las estaciones AAIG, RPIG y GTIG se empleó un archivo para la componente vertical y otro para las componentes horizontales). En la deconvolución se aplicó un filtro de 0.005, 0.0125, 20 y 30 Hz (0.008, 0.01, 40 y 50 Hz para los registros de MNIG, por tratarse de un sensor CMG3T, con una respuesta plana distinta al resto de las estaciones) para no tomar en cuenta las frecuencias en donde el instrumento tenga una respuesta plana.

Una vez removida la respuesta instrumental, se realizó la relocalización de los sismos en SEISAN. La localización de un sismo incluye información del epicentro, hipocentro y tiempo de origen. Para calcular la localización, se requieren los tiempos de llegada de las ondas P en las estaciones que registraron el sismo. Es claro que el resultado es más confiable cuando se utilizan para el cálculo los arribos de ondas P y S en varias estaciones. Sin embargo, debido a la disponibilidad de registros, la mayor parte de las localizaciones de este trabajo, sobre todo las anteriores a 2014, se realizaron tomando en cuenta los registros en las estaciones LNIG y MNIG. El contar con registros en una o dos estaciones, funciona para hacer una localización, porque se tienen las tres componentes de movimiento, pero es necesario que se identifiquen al menos tres fases. Como las ondas P están polarizadas vertical y radialmente, el vector de amplitud de la onda P puede usarse para calcular el azimut inverso al epicentro usando el registro de un sismo en una sola estación. El azimut inverso es el ángulo en la estación entre la dirección al norte y la dirección a la estación, medido en el sentido de las manecillas del reloj.

La fase de onda P se define en la componente vertical, la fase de onda S en la componente N-S o E-W y la tercera fase, de onda Pg impulsiva o emergente, también en la vertical. Al establecer esta última fase, se generan en SEISAN valores de azimut, velocidad aparente y coeficiente de correlación, simultáneamente. En ocasiones es necesario repetir el proceso de selección de la tercera fase, es decir, probar con distintas ventanas de tiempo, con el fin de obtener valores “coherentes” del coeficiente de correlación y velocidad aparente. En general se obtienen mejores resultados con ventanas de tiempo cortas, de fracciones de segundos. Es también de gran importancia que la selección de las fases se haga cuidadosamente, ya que se ha observado que la diferencia de 1 segundo en el arribo de las fases puede llevar a un error en la localización de 10 km, debido a la estructura geológica de la región (Gómez-Arredondo *et al.*, 2016).

Otro parámetro importante en la relocalización es el modelo de velocidades de la corteza. En las

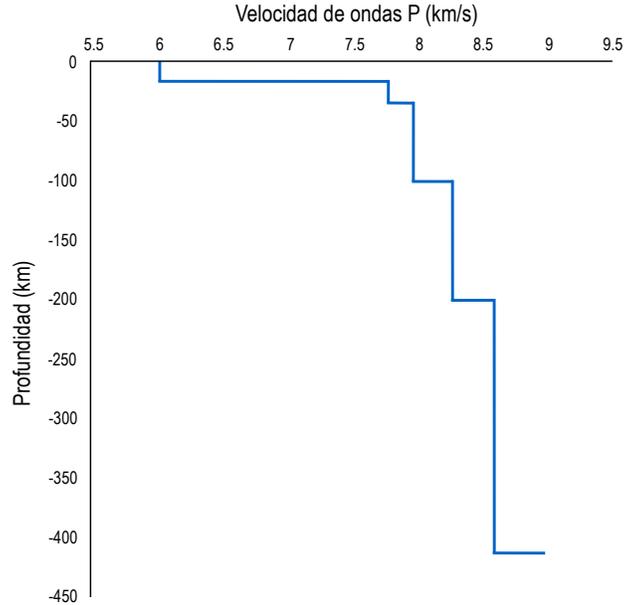


Figura 2.5: Modelo de velocidades de la corteza utilizado por el SSN.

relocalizaciones de este trabajo se aplicó el mismo que usa el SSN (figura 2.5). Se eligió este modelo porque fue verificado en el trabajo de [Gómez-Arredondo \(2014\)](#) contra otros tres modelos y localizando eventos con más de una estación, dando como resultado las menores elipses de error. Estos valores de profundidad y velocidad se pueden revisar en el apéndice D.

2.3. Aproximación de la escala de magnitud

Antes de la parte del procesado en la que se realiza la medición de las máximas amplitudes de los registros, se siguen dos pasos importantes: los registros son integrados con el fin de tenerlos en unidades de desplazamiento (m) y una vez que representan el desplazamiento se convolucionan con la respuesta del sismómetro Wood-Anderson para tener entonces los sismogramas Wood-Anderson simulados (figura 2.6).

Como se ha mencionado en el capítulo 1, en marzo de 2013 la IASPEI adoptó nuevos valores de polos y ceros para la respuesta de un instrumento Wood-Anderson, con base en el trabajo de [Uhrhammer y Collins \(1990\)](#), cuyos resultados mostraron que el valor de magnificación de 2080 se acerca más que

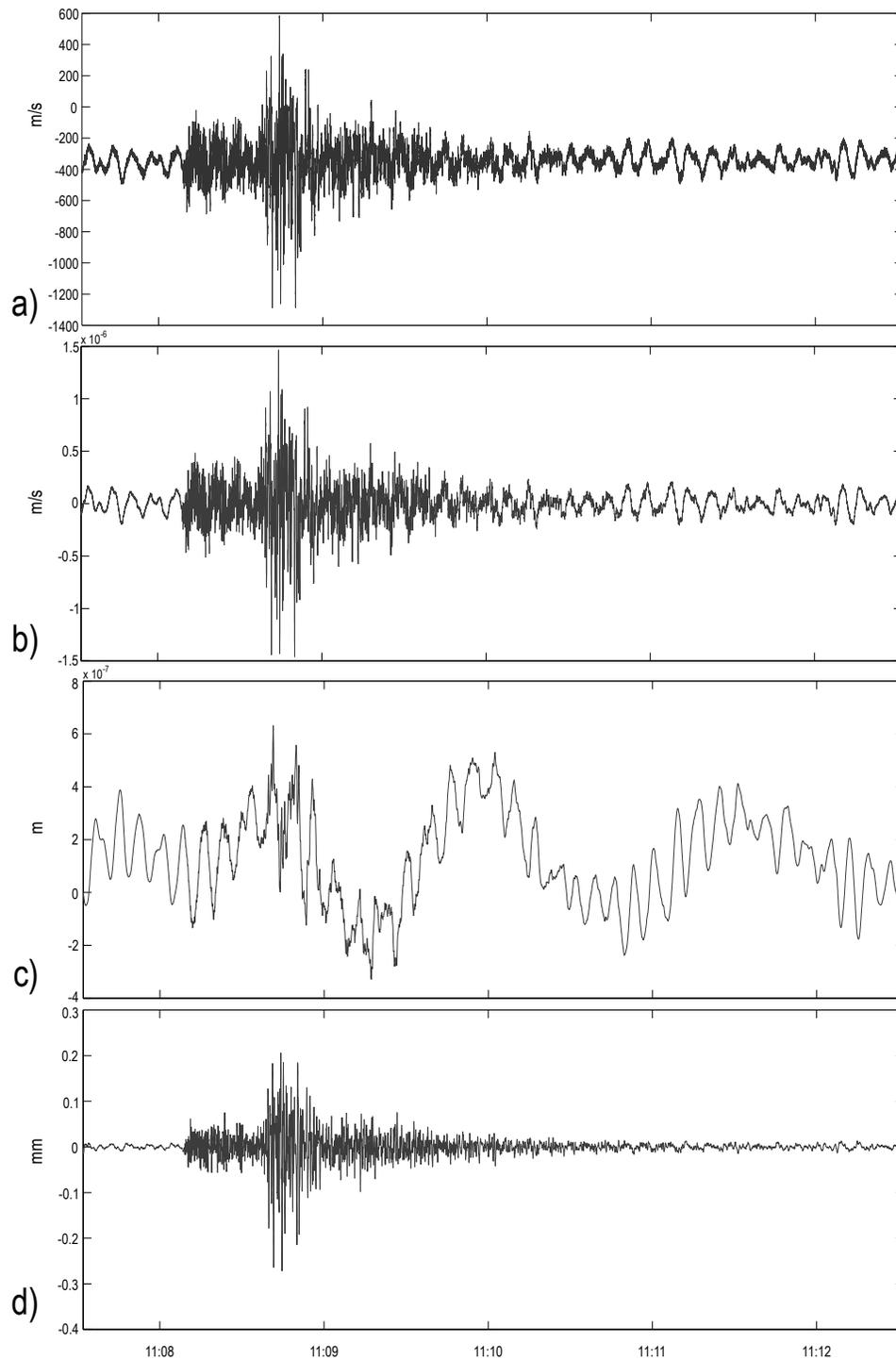


Figura 2.6: Registros de la componente E-W de la estación LNIG para un sismo del 12 de abril de 2015 ($M_c = 4.2$). El registro va de las 11:07:32 a las 11:12:31, en tiempo universal coordinado. **a)** registro descargado de la base de datos del SSN, **b)** registro corregido por el promedio, tendencia y respuesta instrumental, **c)** registro en desplazamiento y **d)** registro convolucionado con la respuesta de un sismómetro Wood-Anderson.

2800 a la verdadera respuesta de un Wood-Anderson. De cualquier forma, en este trabajo se optó por asumir el valor de 2800, esto con base en dos razones principales: de manera general, se garantiza una uniformidad en las estimaciones de magnitud local a nivel global (Bobbio *et al.*, 2009) y de manera particular, porque se ha observado que el valor de 2080 produce una desviación máxima de 0.1 unidades de magnitud (Hafiez *et al.*, 2014; Bockholt *et al.*, 2015), lo cual no afecta los propósitos de esta tesis.

Con la finalidad de seguir la definición original de M_L , al momento de la evaluación de la curva de corrección de distancia $-\log A_0$ se usaron solamente los valores de máxima amplitud Wood-Anderson simulada de cada componente horizontal. Las componentes se usaron por separado, tal como se ha hecho en el procedimiento de otros trabajos (por ejemplo, Bakun *et al.*, 1978; Kanamori y Jennings, 1978; Uhrhammer y Collins, 1990; Kanamori *et al.*, 1993; Savage y Anderson, 1995; Askari *et al.*, 2009). Esto debido principalmente a que la cantidad de registros en la componente vertical es baja, comparada con la cantidad de registros en las componentes horizontales (en cada sismo hay dos registros de las componentes horizontales por cada registro de la componente vertical); además, se ha comprobado que hay muy poca diferencia entre las amplitudes máximas medidas en componentes horizontales y las de verticales (Alsaker *et al.*, 1991; Kang *et al.*, 2000). Así mismo, ya que la profundidad hipocentral es la que tiene mayor incertidumbre, comparada con la latitud y la longitud, se ha usado la distancia epicentral de cada sismo, de la misma forma que han hecho en otros trabajos (por ejemplo, Kim, 1998; González *et al.*, 2006; Rezapour y Rezaei, 2011).

Las 582 distancias epicentrales y las 1163 mediciones de máxima amplitud Wood-Anderson simulada en las componentes horizontales se usaron para calcular la curva de corrección de distancia. En este trabajo se hace uso de un procedimiento paramétrico como el de Hutton y Boore (1987) y Miao y Langston (2007), principalmente porque este método considera expresiones simples de dispersión geométrica y atenuación y se representa con solo algunos coeficientes, lo cual facilita la estimación directa de la magnitud local usando una sola ecuación para todo el rango de estaciones. Entonces, se parte de la ecuación principal de magnitud local

$$M_L = \log(A) - \log(A_0) + S, \quad (2.1)$$

donde A es la máxima amplitud Wood-Anderson simulada, observada en la traza de la componente horizontal, $-\log A_0$ es la función de corrección de distancia determinada empíricamente, con la restricción de que cuando se observa una máxima amplitud de 1 mm a una distancia de 100 km (se ha

decidido usar la restricción de 100 km con base en la distribución de datos en el rango de distancia, véase figura 2.3), $M_L = 3.0$ y S es un factor de corrección de estación determinado empíricamente. Siguiendo a [Hutton y Boore \(1987\)](#), a partir de la ecuación 2.1, se puede expresar $-\log A_0$ como

$$-\log A_{ij} = n \log\left(\frac{r_{ij}}{100}\right) + K(r_{ij} - 100) + 3.0 - M_{L_j} + S_j, \quad (2.2)$$

donde n y K son parámetros relacionados con la dispersión geométrica y atenuación anelástica, respectivamente, A_{ij} es la máxima amplitud horizontal del i -ésimo evento observada en la j -ésima componente de la estación, r_{ij} es la distancia epicentral del i -ésimo evento a la j -ésima componente de la estación, M_{L_j} es la magnitud local del i -ésimo evento, y S_j es el factor de corrección de la j -ésima componente de la estación.

Al reorganizar la ecuación 2.2 se tiene

$$-n \log\left(\frac{r_{ij}}{100}\right) - K(r_{ij} - 100) + M_{L_j} - S_j = \log A_{ij} + 3.0, \quad (2.3)$$

la cual puede expresarse en forma matricial como

$$Gm = d. \quad (2.4)$$

De esta manera, la ecuación 2.4 representa un problema de inversión lineal que puede resolverse mediante varios métodos como mínimos cuadrados, máxima verosimilitud o métodos de inversión generalizados ([Aki y Richards, 1980](#); [Menke, 1984](#); [Lay y Wallace, 1995](#); [Aster *et al.*, 2005](#)).

Si G es una matriz $m \times n$ y los elementos de G son número reales, cuando $m \neq n$, hay una matriz inversa generalizada y única G^{-g} que puede usarse para resolver la ecuación 2.4:

$$m = G^{-g}Gm = G^{-g}d. \quad (2.5)$$

Esta matriz inversa generalizada G^{-g} se determina por medio de una descomposición en valores singulares, como se presenta en [Aster *et al.* \(2005\)](#).

Con base en la ecuación 2.3, si el número de sismos en la base de datos es p y el número de componentes de las estaciones es q , las matrices de la ecuación 2.4 pueden escribirse de la siguiente

manera

$$G = \begin{pmatrix} -\log\left(\frac{r_{11}}{100}\right) & -(r_{11} - 100) & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\log\left(\frac{r_{12}}{100}\right) & -(r_{12} - 100) & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -\log\left(\frac{r_{p(q-1)}}{100}\right) & -(r_{p(q-1)} - 100) & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 \\ -\log\left(\frac{r_{pq}}{100}\right) & -(r_{pq} - 100) & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}_{pq \times (p+q+2)}, \quad (2.6)$$

$$m = \begin{pmatrix} n \\ K \\ M_{L_1} \\ \vdots \\ M_{L_p} \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{q-1} \\ S_q \end{pmatrix}_{(p+q+2) \times 1}, \quad (2.7)$$

$$d = \begin{pmatrix} \log A_{11} + 3.0 \\ \log A_{12} + 3.0 \\ \vdots \\ \log A_{p(q-1)} + 3.0 \\ \log A_{pq} + 3.0 \end{pmatrix}_{pq \times 1}. \quad (2.8)$$

Además, se establece una restricción adicional para que la suma de las correcciones de estación sea igual a cero, para obtener

$$G = \begin{pmatrix} -\log\left(\frac{r_{11}}{100}\right) & -(r_{11} - 100) & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\log\left(\frac{r_{12}}{100}\right) & -(r_{12} - 100) & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -\log\left(\frac{r_{p(q-1)}}{100}\right) & -(r_{p(q-1)} - 100) & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 \\ -\log\left(\frac{r_{pq}}{100}\right) & -(r_{pq} - 100) & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}_{(pq+1) \times (p+q+2)},$$

$$m = \begin{pmatrix} n \\ K \\ M_{L_1} \\ \vdots \\ M_{L_p} \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{q-1} \\ S_q \end{pmatrix}_{(p+q+2) \times 1}, \quad d = \begin{pmatrix} \log A_{11} + 3.0 \\ \log A_{12} + 3.0 \\ \vdots \\ \log A_{p(q-1)} + 3.0 \\ \log A_{pq} + 3.0 \\ 0 \end{pmatrix}_{(pq+1) \times 1}. \quad (2.9)$$

Es claro que en la ecuación 2.9 los valores observados de un evento en una de las componentes de una estación, para distancia hipocentral r y máxima amplitud A , pueden ser usados para construir una fila de las matrices G y d , respectivamente. Estas dos matrices se construyeron con base en los valores disponibles en la base de datos, ya que no todos los sismos se registraron en las seis estaciones. Entonces, como la base de datos incluye 1163 mediciones de amplitud de 381 sismos observados en doce componentes horizontales, las dimensiones de la matriz G son 1164×395 , las de la matriz m 395×1 y las de la matriz d 1164×1 , dando lugar a un problema de inversión sobredeterminado.

Para resolver la ecuación 2.9, se construyeron las matrices G y d y se calculó la matriz inversa generalizada G^{-g} haciendo uso de la técnica de descomposición en valores singulares (Aster *et al.*, 2005) y se determinaron los parámetros n , K , los 381 valores de M_L y las 12 correcciones para las componentes horizontales de las estaciones, ya que la linealidad del problema y el tamaño de las matrices permiten hacer todo de manera simultánea.

Una vez calculados los parámetros, se pueden calcular los residuales de las magnitudes con los registros en cada estación:

$$Residual M_L = M_{L_{calculada}} - M_{L_{observada}}. \quad (2.10)$$

Luego, asumiendo que los errores en los datos son aleatorios y gaussianos, se puede usar la varianza de la gráfica de los residuales de M_L versus la frecuencia para determinar los errores en los parámetros del modelo. Entonces, siguiendo aún el procedimiento mencionado en [Aster et al. \(2005\)](#), los intervalos de confianza de 95 % para cada parámetro del modelo pueden encontrarse usando

$$m \pm 1.96 \times \text{diag}(\text{Cov}(m))^{1/2}, \quad (2.11)$$

en la cual, la covarianza de los parámetros del modelo puede obtenerse usando la relación

$$\text{Cov}(m) = \sigma^2 (G^T G)^{-1}. \quad (2.12)$$

Entonces, usando las relaciones entre las ecuaciones 2.11 y 2.12 y la varianza σ^2 de los residuales de M_L se pueden obtener los parámetros del modelo para n y K y el resto de los parámetros con un 95 % de confianza, los cuales se encuentran en $\text{Cov}(m)$.

Capítulo 3

Resultados y discusión

En la primera parte de este capítulo se presentan los resultados de las localizaciones de los sismos de la base de datos. Después, se discute la curva de corrección de distancia $-\log A_0$ que forma parte de la escala de magnitud local que se ha obtenido y se comparan los resultados observados para el noreste de México con los de otras regiones. También se revisan las correcciones de estaciones y se comparan los valores de magnitud local obtenidos con los valores de magnitud de duración reportados. Finalmente, se hace una relación Gutenberg-Richter con los valores de M_L para revisar especialmente el valor de b y asociar este resultado a características de la región.

3.1. Relocalización de los sismos

El rango de distancias epicentrales después de las localizaciones es de $0.59 \leq \Delta \leq 584.69$ km. Es de notarse que este rango se ha extendido, sobre todo para distancias más cortas, las cuales se deben a algunos sismos localizados cerca de la estación MCIG. Los epicentros relocalizados de los 381 sismos pueden revisarse en el mapa de la figura 3.1. Todos los valores de rms de las relocalizaciones son menores de 0.53. La información de 49 de los 381 sismos, en el periodo de agosto a diciembre de 2012, es la misma que aparece en el trabajo de [Gómez-Arredondo \(2014\)](#), en el cual se usó una red temporal de estaciones para las localizaciones. Toda esta información también se puede revisar en la tabla del apéndice B.

Al ver el mapa de la figura 3.1 se nota de forma directa que hay una tendencia radial en la ubicación de algunos de los epicentros, en torno a la estación LNIG. Esto se debe principalmente a que el 83.7%

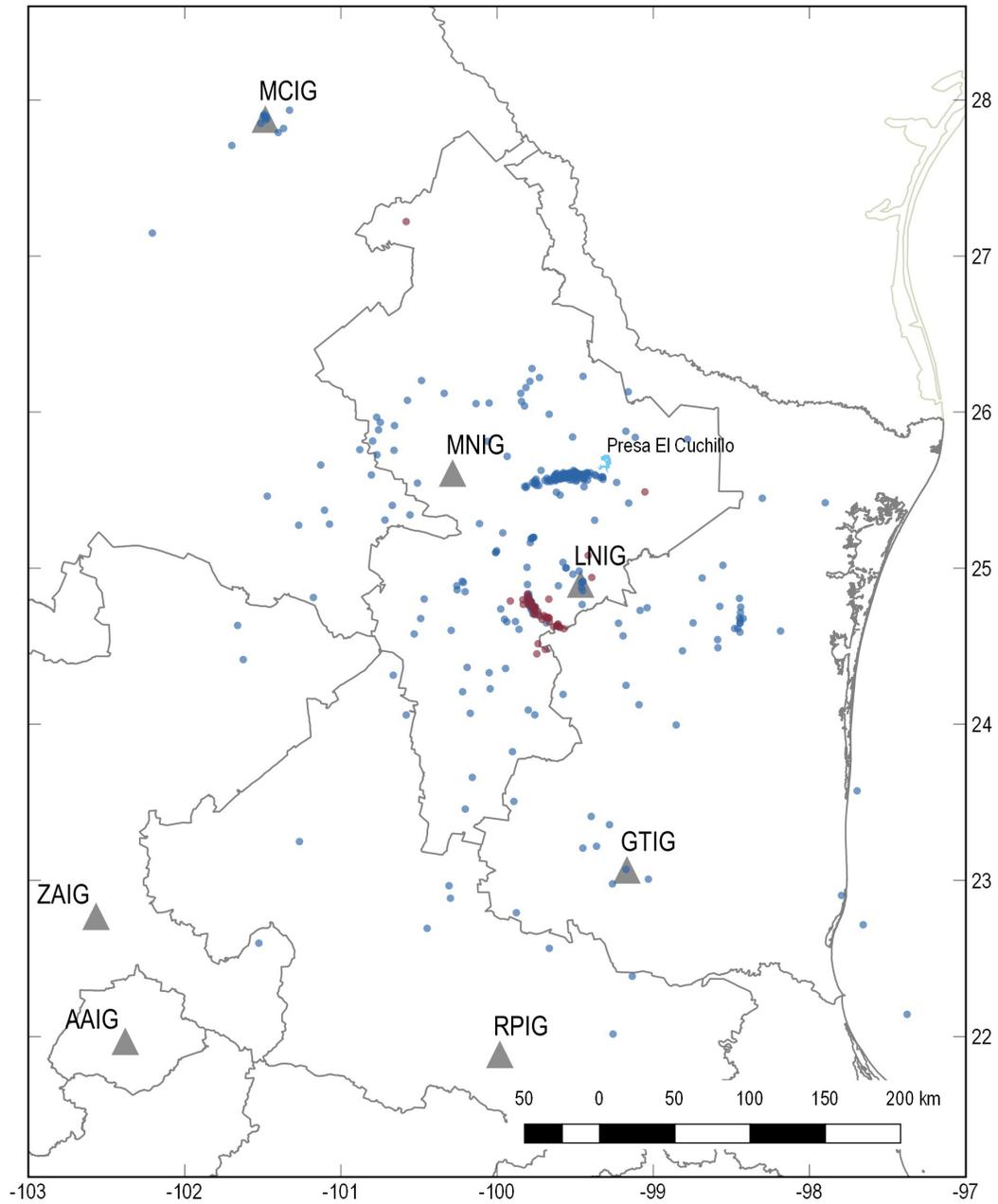


Figura 3.1: Mapa de los 381 sismos relocalizados. Se incluyen los 49 sismos para el periodo de agosto a diciembre de 2012, del trabajo de Gómez-Arredondo (2014), en color rojo. Se muestra la ubicación de la presa El Cuchillo.

de los 381 eventos fue localizado usando registros solamente de esa estación, en el método de azimut inverso. Se puede observar, por ejemplo, un agrupamiento de eventos al suroeste de la presa El Cuchillo, cuya ubicación puede considerarse correcta, porque esta misma área es donde la población ha sentido sismos con reportes de valores de intensidad hasta VI, a diferencia del área hacia el este de la presa, donde no se reportó alguna intensidad (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2015).

Otro punto que favorece la aceptación de las relocalizaciones que muestran esta tendencia surge de la observación de la forma de onda de los registros. Por ejemplo, durante el procesado pudo notarse que la forma de onda del agrupamiento que se observa al suroeste de la presa El Cuchillo es muy similar, lo cual puede ser indicador de una fuente común. En el noreste de México también se ha observado algo similar en un enjambre sísmico de 2012, en el trabajo de Gómez-Arredondo (2014).

3.2. Función de atenuación $-\log A_0$

De la inversión de las matrices para todo el conjunto de datos se obtuvo un valor de dispersión geométrica $n = 0.4136$ y de atenuación $K = 0.0001$, haciendo que $-\log A_0$ quede definido como

$$-\log A_0 = 0.4136 \left(\frac{r}{100} \right) + 0.0001 (r - 100) + 3.0, \quad (3.1)$$

de manera que la fórmula resultante para calcular un valor de magnitud local es

$$M_L = \log(A) + 0.4136 \left(\frac{r}{100} \right) + 0.0001 (r - 100) + 3.0 + S, \quad (3.2)$$

siendo A el valor de la máxima amplitud en un sismograma Wood-Anderson simulado (en mm), r la distancia epicentral a la estación de observación y S el valor de corrección de dicha estación (en la sección 3.3 se presentan los resultados de las correcciones de las estaciones).

El rango de M_L que se obtuvo para los 381 sismos es de $1.2 \leq M_L \leq 5$ y se puede revisar su distribución en la figura 3.2, junto con la distribución de distancias epicentrales. Haciendo uso de estos valores para $-\log A_0$, se calcularon los residuales de M_L , los cuales se pueden revisar en la figura 3.3 y se puede ver que, en general, los valores más grandes de residuales se encuentran en general a mayor distancia, sobre todo después de 400 km.

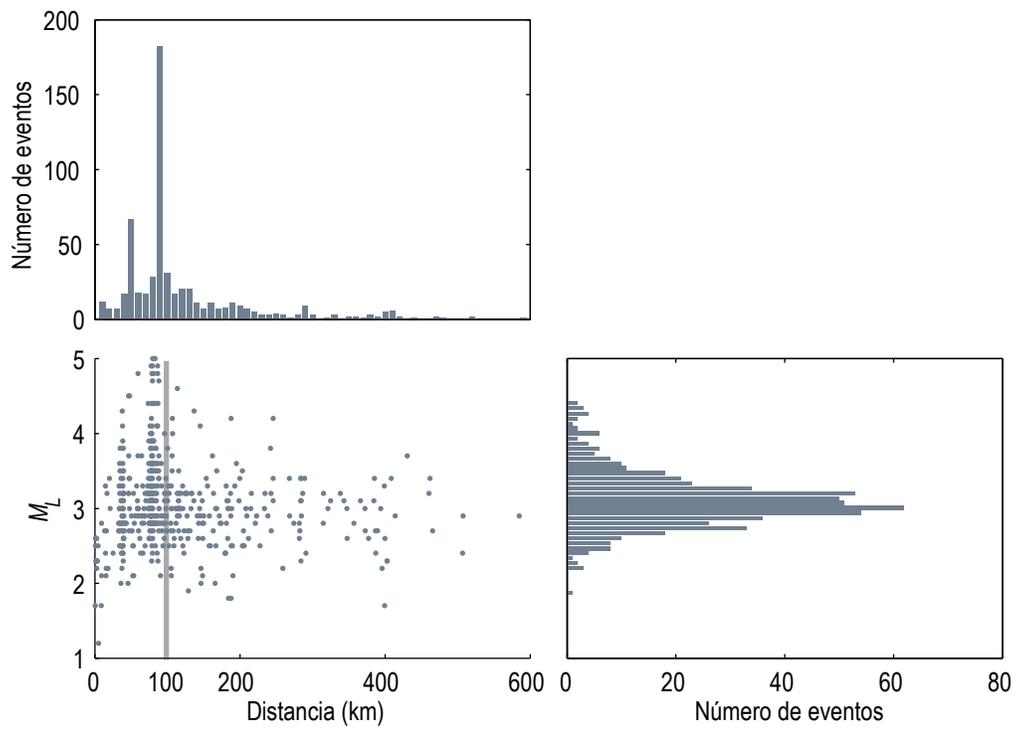


Figura 3.2: Distribución de valores de magnitud local obtenidos en la inversión del sistema $Gm=d$ y distancias epicentrales a partir de las relocalizaciones.

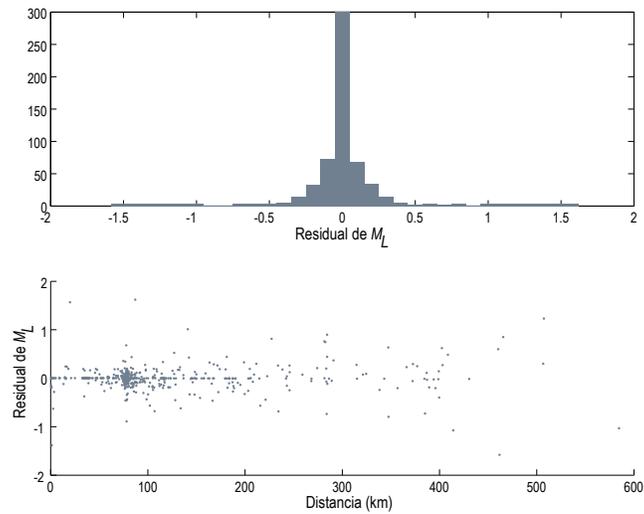


Figura 3.3: Distribución de residuales de M_L .

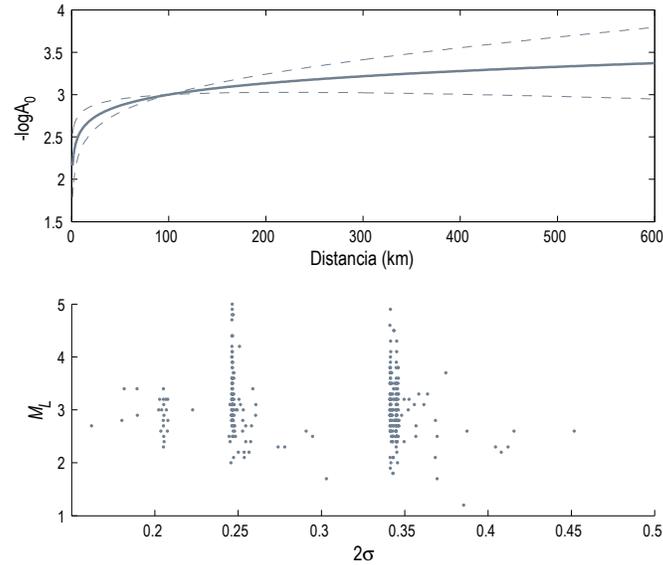


Figura 3.4: Gráfica de $-\log A_0 \pm 2\sigma$ (arriba) y distribución de 2σ versus M_L (abajo).

Se puede observar que los valores de la mayor parte de los residuales se acercan a cero y tienen una distribución normal, lo cual permite calcular la varianza $\sigma^2 = 0.058$ y la desviación estándar $\sigma = 0.24$. Con el valor de σ^2 se calculó la matriz que representa los errores de los 395 parámetros del sistema $Gm = d$, de forma que los valores de 2σ para n y K son 0.1579 y 0.0006, respectivamente, los cuales se pueden revisar junto con la distribución de los 381 valores de 2σ correspondientes a M_L , en la figura 3.4 y en general no se nota una tendencia.

Otro de los propósitos de este trabajo era comparar el noreste de México, como área de baja sismicidad, por medio de la función empírica de atenuación $-\log A_0$, con otras regiones de alta o baja sismicidad para las cuales también se ha obtenido una escala de magnitud local. En la figura 3.5 se ilustra el comportamiento de $-\log A_0$ junto con las de otras regiones. En la comparación se han incluido las curvas obtenidas en México para el norte (Vidal y Munguía, 1999) y sur (González *et al.*, 2006) de la península de Baja California y el Valle de México (Ortega y Quintanar, 2005) y curvas en Estados Unidos para el oeste (en el sur de California; Hutton y Boore, 1987), centro (Miao y Langston, 2007) y este (Kim, 1998).

Partiendo entonces del comportamiento de $-\log A_0$ en la figura 3.5, primero se comprueba la expectativa planteada en el capítulo 1 sobre la diferencia en la función de atenuación con respecto a la

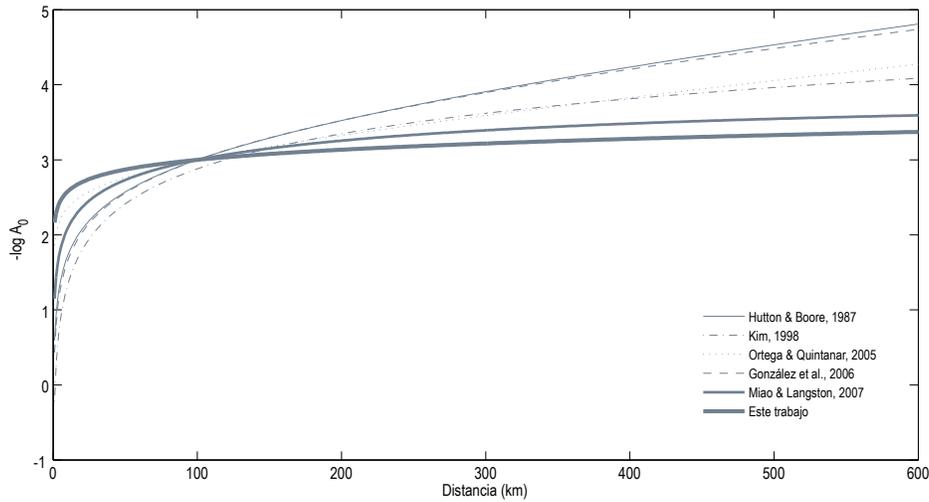


Figura 3.5: Comparación de $-\log A_0$ para el noreste de México y otras regiones

de sur de California del trabajo de [Hutton y Boore \(1987\)](#). Es claro que a partir de 100 kilómetros hay una menor atenuación para la función del noreste de México respecto al resto de las curvas, es decir, la amplitud no decae considerablemente con la distancia.

Los resultados que se obtuvieron de los trabajos de [Vidal y Munguía \(1999\)](#) y [González *et al.* \(2006\)](#) para regiones en el norte y sur de la península de Baja California, respectivamente, son muy parecidos a los de [Hutton y Boore \(1987\)](#) y, por lo tanto, la atenuación en el noreste de México obtenida en este trabajo también es menor que en aquella región. Con respecto al Valle de México, comparando con los resultados de [Ortega y Quintanar \(2005\)](#), se observa que después de 100 km la atenuación también es menor. Esta diferencia con el Valle de México también podría encontrarse dentro de las expectativas porque se sabe que el Valle de México presenta un modelo de atenuación complejo sobre todo a distancias cortas, pero en general tiende a ser una región con una atenuación alta ([Ottemöller *et al.*, 2002](#); [Ortega y Quintanar, 2005](#); [García-Jiménez, 2006](#); [Chen y Clayton, 2012](#)). Puede notarse que la curva obtenida para el este de Norteamérica ([Kim, 1998](#)) se encuentra en general cerca a la del Valle de México, por lo tanto, presenta también una atenuación mayor que la que se ha encontrado para el noreste de México.

Este comportamiento sugiere la influencia de la estructura de velocidad y/o atenuación en la región. También implica que la amplitud Wood-Anderson que se podría esperar en el noreste de México sería

aproximadamente 10 veces mayor a la del sur de California y la península de Baja California y también mayor a la del valle de México. Además, pone en evidencia que las áreas donde se sienta un sismo grande van a ser mayores en el noreste de México que en la región noroeste o la región centro, lo cual resulta de importancia, ya que se sabe que en el noreste existe la posibilidad de ocurrencia de sismos de $M \sim 6$ (Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008). Esta observación es significativa porque sus implicaciones son importantes en el tema de peligro sísmico.

Es de remarcar que la curva $-\log A_0$ obtenida en este trabajo es muy cercana a la que obtuvieron Miao y Langston (2007) para el centro de Estados Unidos e incluso son las que muestran menor atenuación. De hecho, este resultado coincide con el planteamiento de Montalvo-Arrieta *et al.* (2015), en el que se compararon valores de intensidad con modelos propuestos para el centro de Estados Unidos y se encontró una buena correlación. Cabe mencionar que el noreste de México ya ha sido incluido como el límite sur de la región del centro de Estados Unidos en el trabajo de Kanter (1994). La similitud entre ambas curvas de atenuación es de gran importancia ya que se ha comprobado que, para eventos sísmicos de la misma magnitud, las áreas en las cuales se sentirían los sismos en el centro de Estados Unidos son mucho más grandes que las del sur de California (Nuttli, 1973; Johnston y Schweig, 1996).

Es notable una mayor atenuación antes de los 100 km en la curva $-\log A_0$ de este trabajo en comparación al resto de las curvas. Este comportamiento podría asociarse al rango de profundidades de los eventos, ya que un 96.3 % de los 381 sismos fue reportado a profundidades someras (< 20 km), o a un efecto de radiación de la fuente que cause un incremento en las amplitudes máximas de eventos a distancias menores de 100 km, en comparación con las otras regiones. De cualquier forma, solo un poco más de la cuarta parte (27 %) de los 381 eventos usados en este trabajo se encuentra en el rango de distancias de $0.59 \leq \Delta \leq 70$ km, lo cual aumenta la incertidumbre de la estimación de atenuación a distancias cortas.

3.3. Correcciones de las estaciones

Las 12 correcciones tienen un rango de -0.6197 a 0.6324 y se muestran en la tabla 3.1, junto con los valores de desviación estándar para el intervalo de confianza de 95 %. En general, los valores de corrección en las componentes horizontales de las estaciones se relacionan a las condiciones locales del suelo y la instalación del instrumento (Richter, 1958), es decir, muestran la variabilidad entre estaciones.

Tabla 3.1: Correcciones para las componentes horizontales de las seis estaciones.

Clave de estación	E-W	N-S	2σ
LNIG	0.5174	0.5971	0.0724
MNIG	0.5722	0.6324	0.0800
GTIG	-0.1107	-0.0221	0.0971
RPIG	-0.2608	-0.1397	0.1550
AAIG	-0.6197	-0.4337	0.1949
MCIG	-0.3044	-0.4281	0.1456

Si todas las estaciones están instaladas correctamente y de la misma manera, se puede decir que una estación con una corrección positiva presentaría un valor de movimiento de suelo menor al de una estación con una corrección negativa para cualquier sismo, antes de que se apliquen las correcciones. Es decir, una estación con una corrección negativa amplifica las ondas sísmicas, comparada con una estación con corrección positiva, suponiendo que las condiciones instrumentales sean las mismas.

Se obtuvieron los valores de corrección negativos para las estaciones que se encuentran al oeste del área de estudio, pero la incertidumbre de estos resultados es alta porque estas estaciones cuentan con un número menor de registros. De hecho, la cantidad de registros de AAIG, MCIG y RPIG representan el 6% del total en la base de datos.

3.4. Comparación entre los valores de magnitud de coda (M_c) y magnitud local (M_L)

El siguiente objetivo de este trabajo fue comparar los valores de M_L obtenidos para los 381 sismos del catálogo con los valores preliminares de M_c reportados por el SSN.

En una primera observación, el rango de diferencia entre los dos tipos de magnitud es de -1.1 a 2.1 unidades, dentro del cual el 8.7% de los sismos tiene una diferencia mayor a 1 unidad. Al comparar ambas magnitudes en una regresión lineal, se obtiene la siguiente relación

$$M_L = 0.8840M_c - 0.0538, \quad (3.3)$$

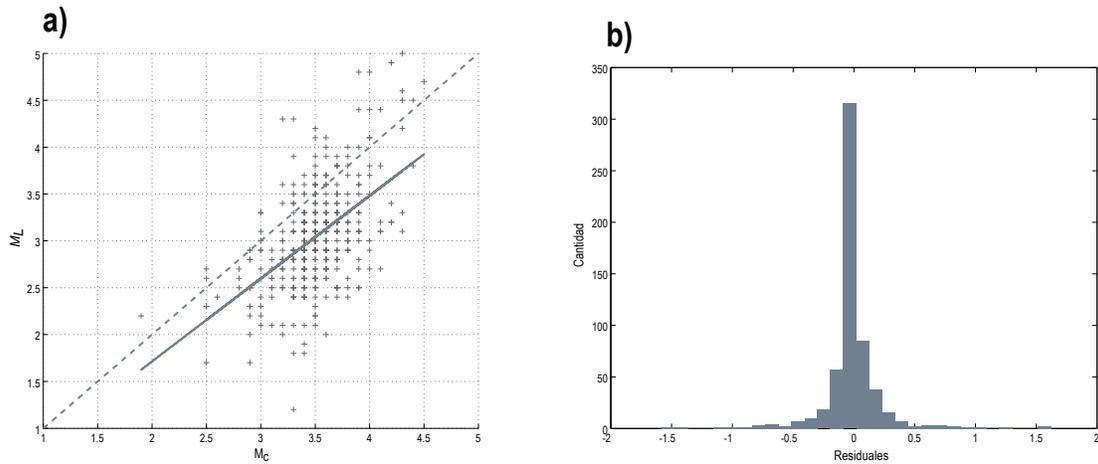


Figura 3.6: a) Comparación entre M_c y M_L . La línea punteada representa $M_c = M_L$ y la línea continua representa la relación en la regresión lineal. b) Histograma de residuales de $M_L - M_L$ calculada.

cuya gráfica puede revisarse en la figura 3.6, junto con el histograma de los residuales de $M_L - M_L$ calculada, los cuales tienen una distribución normal. Puede verse en dicha figura que gran parte de los valores de magnitud local son menores a los valores de magnitud de duración reportados, sobre todo para magnitudes bajas ($M_L < 3$).

Como se ha mencionado en el primer capítulo, el cálculo de M_c es conveniente porque facilita una pronta respuesta cuando sea que ocurre un evento. De cualquier forma, y debido a que la relación de la ecuación 3.3 muestra un coeficiente de determinación moderado $R^2 = 0.3$, no es recomendable tratar de obtener un valor de magnitud local a partir del cálculo de M_c , al menos no sin realizar una medición precisa de la amplitud Wood-Anderson del sismo en observación.

3.5. Valor de b

El manejo estadístico de la información de grupos de sismos tiene resultados que se pueden involucrar tanto a procesos de fuente como a estimación de riesgo (Stein y Wyssession, 2009). Por esta razón, otro de los objetivos de este trabajo es calcular los coeficientes en una relación Gutenberg-Richter haciendo uso de los valores de M_L obtenidos (Gutenberg y Richter, 1944), con la principal intención de revisar la recurrencia de sismos con magnitudes mayores que 4 y un valor de b preliminar que se pueda asignar a la región.

Esta relación puede expresarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\log N = a - bM, \quad (3.4)$$

donde N es el número de eventos acumulados en la región para una ventana de tiempo específica con magnitudes iguales o mayores que M . La constante a es una medida del nivel de sismicidad o productividad sísmica de la región (Kossobokov *et al.*, 2000) y matemáticamente expresa el logaritmo del número de sismos con magnitudes mayores que cero, es decir, el total esperado de eventos en la región si se extrapola la relación hasta las magnitudes más pequeñas. El valor de b es la pendiente de la distribución de los sismos en escala logarítmica de la distribución Gutenberg-Richter, y su valor se acerca a 1 en grandes escalas de tiempo y espacio, pero también ocurren variaciones significativas a escalas menores (Stein y Wyss, 2009).

Hay dos parámetros físicos que perturban el valor estándar de 1 para b (Wiemer y Wyss, 1997): el esfuerzo y la heterogeneidad. En pruebas de laboratorio (Scholz, 1968) y en minas (Urbancic *et al.*, 1992) se ha demostrado que el valor de b es inversamente proporcional al esfuerzo. También hay evidencia adicional que apoya la observación que en zonas de fallamiento inverso se observan valores bajos de b (< 1), comparados con valores más altos de b (> 1) presentes en ambientes de fallamiento normal (incluso abarcando un rango de submilímetros hasta cientos de kilómetros de largo en una ruptura). Es posible que se presenten efectos que surjan de las propiedades del material y/o modificaciones del tensor de esfuerzos, pero de manera general, el valor de b puede emplearse como un “medidor de esfuerzo” en la corteza de la Tierra (Schorlemmer *et al.*, 2005).

Es importante mencionar que dentro del periodo en el que ocurrieron los 381 sismos de la base de datos ocurrió una secuencia de 123 eventos de octubre a julio de 2014, cercana a la presa El Cuchillo (cerca de los municipios de Cadereyta, China, General Terán y Montemorelos). Montalvo-Arrieta *et al.* (2015) mencionan dos hipótesis para esta secuencia: un proceso de reactivación de fallas antiguas asociadas con estructuras geológicas de la región y un caso de sismicidad provocada por la misma presa El Cuchillo como consecuencia de un período extraordinario de lluvia. En cualquiera de las dos hipótesis, y como ocurrieron con mayor frecuencia que la que se puede adjudicar en la región, los eventos característicos de esta secuencia y sus valores de magnitud afectan la linealidad a la hora de calcular los coeficientes de la ecuación 3.4.

Tabla 3.2: Valores de a y b para cada set de datos.

Set de eventos	Cantidad	a	b	Mc
1. Base de datos completa	381	4.98	0.896 ± 0.05	2.9
2. Base de datos sin la secuencia de El Cuchillo	258	5.28	1.08 ± 0.08	2.9
3. Secuencia de El Cuchillo (octubre 2013 – julio 2014)	123	4.48	0.826 ± 0.09	3.1

Por esto, y para poder hacer una comparación de los posibles valores de b , se calcularon los coeficientes con 3 conjuntos de datos: (1) usando la base de datos de este trabajo en su totalidad, (2) excluyendo los sismos de la secuencia de El Cuchillo y (3) usando solamente los sismos de la secuencia de El Cuchillo. Los resultados se pueden revisar en la tabla 3.2. Este cálculo se realizó con el software ZMAP (Wiemer, 2001), que para operar requiere un catálogo que incluye el tiempo de ocurrencia de los eventos, la localización, la magnitud y la profundidad.

Como se puede ver en la tabla 3.2, el valor de b que se obtiene solamente para los sismos de la secuencia de El Cuchillo es bajo ($b = 0.826$). Este resultado es comparable con los valores bajos que se han obtenido en otras regiones para secuencias sísmicas generadas por presas (p. e. Rastogi *et al.*, 1997; Muço, 1998; Hassoup, 2002).

La diferencia más importante se encuentra en los valores de b para los primeros dos sets de datos ya que, si se toma en cuenta la secuencia de El Cuchillo, el valor que se obtiene para b es menor a 1 ($b = 0.896$), lo cual implicaría (según lo mencionado anteriormente), entre otras características, una concentración alta de esfuerzos y un ambiente de fallamiento inverso; por otro lado, con el segundo set de datos se obtiene un valor de b alto ($b = 1.08$), que sería un resultado característico tanto de esfuerzos de cizalla bajos (Scholz, 1968; Wyss, 1973; Urbancic *et al.*, 1992; Katsumata, 2006) como de ambientes de fallamiento normal (Schorlemmer *et al.*, 2005) para el noreste de México.

Respecto al ambiente de fallamiento, se sabe que algunos autores han observado que el campo de esfuerzos en la región es extensional (Suter, 1991; Márquez-Azúa y DeMets, 2003), una característica relacionada con fallas normales, aunque también se ha descubierto que para algunas áreas dentro de la región sucede lo contrario (Gómez-Arredondo *et al.*, 2016). Por todo lo anterior, y tomando en cuenta que el noreste de México se caracteriza por una concentración baja de esfuerzos, se optó por elegir $b = 1.08$, correspondiente al segundo set de datos:

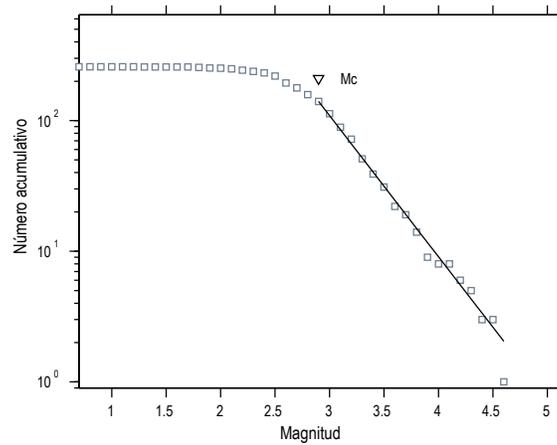


Figura 3.7: Relación Gutenberg-Richter para los 258 sismos usados en ZMAP. M_c se refiere a la magnitud de completitud (ver texto).

$$\log N = 5.28 - 1.08M. \quad (3.5)$$

La magnitud de completitud que acompaña esta ecuación es $M_c = 2.9$, a partir de la cual se puede considerar al catálogo como completo y la gráfica puede revisarse en la figura 3.7.

Por lo tanto, si en la ecuación 3.5 se calcula la recurrencia de eventos con $M_L \geq 4$ para un período de 10 años, se observa que puede esperarse 1 sismo mayor de 4 cada año, aproximadamente, y esta observación concuerda con el promedio de sismos con $M_L \geq 4$ anuales que se presenta en los 10 años que comprenden la base de datos.

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se calculó la primera escala de magnitud local M_L aplicable para el noreste de México, con base en la inversión de los valores disponibles de máxima amplitud de registros Wood-Anderson simulados de 381 sismos. Se conformó una base de datos con los registros en las componentes horizontales de las estaciones LNIG, MNIG, GTIG, MCIG, RPIG y AAIG, en el período de 2006 a 2015, con un rango de magnitud de coda de $1.9 \leq M_c \leq 4.5$ y de distancia epicentral de $8.6 \leq \Delta \leq 561.61$ km. Fueron relocalizados 332 de los 381 sismos, para obtener un nuevo rango de distancia epicentral de $0.59 \leq \Delta \leq 584.69$ km (con una mayor representación alrededor de 100 km).

A partir de la relocalización, se usaron 1163 registros junto con las distancias epicentrales en la inversión para encontrar simultáneamente la función de corrección de distancia $-\log A_0$ (que incluye los valores de dispersión geométrica $n = 0.4136$ y atenuación $K = 0.0001$), valores de M_L y correcciones de estación. La ecuación de $-\log A_0$ que se obtuvo fue:

$$-\log A_0 = 0.4136 \left(\frac{r}{100} \right) + 0.0001 (r - 100) + 3.0,$$

con amplitud Wood-Anderson simulada A_0 y distancia epicentral r . El rango de magnitudes que resultó de la inversión es de $1.2 \leq M_L \leq 5$.

Respecto a las 12 correcciones para las componentes horizontales de las estaciones, se obtuvo un rango de -0.6197 a 0.6324 y se destaca que los valores más grandes y negativos corresponden a las estaciones que se encuentran al oeste del área de estudio, pero al mismo tiempo la incertidumbre de la estimación es grande porque son las estaciones que contaban con una representación menor de registros

(6% del total).

Al comparar la función de corrección de distancia $-\log A_0$ obtenida para el noreste de México, con las que se han calculado para otras regiones, pudo notarse una menor atenuación con la distancia respecto al sur de California (tal como se esperaba), el este de Estados Unidos y el Valle de México. Por otro lado, una de las observaciones más importantes es la coincidencia con la atenuación que se ha obtenido para el centro de Estados Unidos, corroborando lo que se ha propuesto en algunos trabajos sobre la similitud entre estas dos regiones.

Esta observación es significativa ya que sus implicaciones son importantes en el tema de peligro sísmico porque la amplitud Wood-Anderson que se podría esperar para un evento en el noreste de México sería aproximadamente 10 veces mayor a la del sur de California y la península de Baja California y también mayor a la del Valle de México. Además, pone en evidencia que las áreas donde se sienta un sismo grande van a ser mayores en el noreste de México que en la región noroeste o la región centro, así como la naturaleza de la propagación de ondas en la región.

También se realizó una comparación con los valores de magnitud de coda M_c reportados de manera preliminar por el SSN y se observó que, en general, los valores de M_L obtenidos son menores a los de M_c y se relacionan por el siguiente modelo lineal:

$$M_L = 0.8840M_c - 0.0538.$$

Al excluir 123 eventos de la secuencia de El Cuchillo (octubre de 2013 a julio de 2014), se encontró un valor de $a = 5.28$ y $b = 1.08$ en la relación Gutenberg-Richter. Se plantea que el valor alto de b es característico de una concentración de esfuerzos de cizalla bajos y ambientes de fallamiento normal en la región. Estos valores son importantes para el análisis de peligro sísmico en el noreste de México, sobre todo porque implican, por ejemplo, la ocurrencia de un sismo $M_L \geq 4$ cada año, en un periodo de 10 años.

Sobre las recomendaciones que surgen a partir de este trabajo, lo primero que se puede mencionar es el tema de la cobertura de estaciones en el noreste de México. Aunque existen métodos indirectos para determinar parámetros sismológicos, la información instrumental siempre es de gran utilidad y confianza. El agregar a la red más estaciones con buen funcionamiento y calidad de datos mejoraría en

gran manera los estudios que involucren registros de sismos en la región.

Los resultados de este trabajo podrían ser refinados con la disponibilidad de un mayor volumen de registros de sismos y con estudios futuros. Entre ellos, se pueden mencionar estudios de propiedades de radiación de fuente y propagación de ondas, tanto locales como regionales, sobre todo porque la distribución epicentral de los sismos, antes y después de la relocalización, no es uniforme en todo el noreste de México y más bien se concentra generalmente en el centro y sur del estado de Nuevo León. Yendo más allá, con el uso de intensidades, tomografía de velocidades y/o mapas de flujo de calor se podrían identificar también zonas dentro de la región con ecuaciones y características de atenuación diferentes, así como determinar estructuras en la corteza. Además, se pueden aplicar otros métodos para obtener resultados comparables de la aproximación de la curva de corrección de distancia $-\log A_0$, como el uso de una aproximación no paramétrica o de algoritmos genéticos.

La intención inherente de esta tesis, y sus resultados, es contribuir a la mejora del análisis de peligro sísmico en el noreste de México. El hecho de contar con una escala de magnitud local, que es aplicable a los sismos que ocurren en la región, es un pequeño pero buen paso en todos los que se están dando en la carrera.

Apéndice A

381 sismos reportados por el SSN

Este apartado presenta la información para cada uno de los 381 sismos que forman la base de datos de este trabajo, tal como se reporta en la página del Servicio Sismológico Nacional (www.ssn.unam.mx), en la tabla A.1 de la siguiente página.

Tabla A.1: Información sobre los 381 eventos que forman la base de datos, tal como se reporta en la página del SSN.

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
1	17/04/2006	11:25:10	25.32	-100.38	20	4.3	26 km al SUROESTE de SANTIAGO, NL
2	17/04/2006	11:58:04	25.23	-100.29	20	4.1	26 km al SUROESTE de SANTIAGO, NL
3	23/09/2008	20:46:05	22.46	-97.54	11	4.2	36 km al NORESTE de CD MADERO, TAM
4	30/10/2008	19:45:27	22.54	-97.91	98	4.1	16 km al NORTE de ALTAMIRA, TAM
5	14/06/2009	6:04:06	25.3	-99.33	20	4.4	51 km al ESTE de MONTEMORELOS, NL
6	20/06/2009	3:56:16	24.89	-100.26	20	3.5	50 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
7	20/06/2009	3:57:50	24.87	-100.26	20	3.7	51 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
8	21/06/2009	21:08:06	24.86	-100.22	20	3.7	51 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
9	20/01/2010	15:56:28	25.62	-100.4	5	4	4 km al SUR de S PEDRO GARZA GARCIA, NL
10	13/02/2010	17:52:30	25.72	-101.03	20	3.8	21 km al NOROESTE de RAMOS ARIZPE, COAH
11	26/05/2010	3:11:47	24.63	-100.3	3	3.9	78 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
12	15/06/2010	11:28:41	25.18	-99.87	5	3.4	4 km al OESTE de MONTEMORELOS, NL
13	30/08/2010	5:43:00	25.15	-99.09	20	3.5	58 km al NORESTE de LINARES, NL
14	08/09/2010	12:46:05	23.97	-99.39	28	3.6	36 km al NOROESTE de CD VICTORIA, TAM
15	03/10/2010	22:16:36	25.24	-99.23	20	3.4	54 km al NORESTE de LINARES, NL
16	05/10/2010	3:24:45	25.38	-101.35	5	3.7	35 km al OESTE de SALTILLO, COAH
17	30/12/2010	3:17:08	22.35	-99.8	20	4.3	43 km al NOROESTE de CARDENAS, SLP
18	12/02/2011	19:19:20	23.204	-99.2	38	3.9	56 km al NOROESTE de CD MANTE, TAM
19	26/07/2011	21:28:00	26.31	-101.78	10	4.3	63 km al SUROESTE de CASTAÑOS, COAH
20	30/08/2011	4:24:25	24.92	-99.33	5	2.5	25 km al NORESTE de LINARES, NL
21	01/09/2011	22:09:35	25.11	-99.69	20	3.6	16 km al SURESTE de MONTEMORELOS, NL
22	04/09/2011	5:47:03	24.13	-100.09	20	3.6	78 km al NORESTE de MATEHUALA, SLP
23	08/03/2012	16:39:00	24.08	-100.39	20	3.3	54 km al NORESTE de MATEHUALA, SLP
24	18/04/2012	15:10:29	23.74	-100.93	20	4.4	31 km al NOROESTE de MATEHUALA, SLP
25	20/05/2012	23:22:28	25.13	-100	20	3.6	17 km al SUR de CD DE ALLENDE, NL
26	21/05/2012	6:03:20	25.02	-99.92	10	3.9	21 km al SUROESTE de MONTEMORELOS, NL
27	21/05/2012	7:38:51	25.08	-100.04	16	3.1	23 km al SUR de CD DE ALLENDE, NL
28	28/05/2012	19:27:20	24.77	-99.18	5	4.3	41 km al ESTE de LINARES, NL
29	24/06/2012	20:52:52	22.56	-97.92	16	4.1	18 km al NORTE de ALTAMIRA, TAM
30	06/07/2012	15:17:13	26.25	-99.66	20	3.7	60 km al SURESTE de CD SABINAS HIDALGO, NL
31	11/07/2012	18:21:18	26.28	-100.6	20	3.7	37 km al NOROESTE de HIDALGO, NL
32	15/07/2012	19:46:01	25.15	-99.19	20	3.3	50 km al NORESTE de LINARES, NL
33	21/07/2012	13:32:07	25.02	-99.07	20	3.3	53 km al NORESTE de LINARES, NL
34	22/07/2012	9:58:17	24.75	-99.22	34	3.3	37 km al SURESTE de LINARES, NL
35	22/07/2012	10:07:25	25.07	-99.06	20	3.6	56 km al NORESTE de LINARES, NL
36	22/07/2012	12:31:32	24.7	-99.71	11	3.4	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
37	22/07/2012	14:06:21	25	-99.01	20	3.1	58 km al NORESTE de LINARES, NL
38	23/07/2012	3:27:12	24.96	-99.02	20	3.6	56 km al ESTE de LINARES, NL
39	23/07/2012	5:11:00	24.77	-99.75	20	3	21 km al SUROESTE de LINARES, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
40	23/07/2012	6:24:32	24.77	-99.79	20	3.3	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
41	23/07/2012	11:09:41	25.16	-99.19	20	3.2	51 km al NORESTE de LINARES, NL
42	23/07/2012	12:34:14	24.55	-99.7	20	3.3	37 km al SUROESTE de LINARES, NL
43	23/07/2012	12:41:35	24.71	-99.72	20	3.4	22 km al SUROESTE de LINARES, NL
44	23/07/2012	20:16:31	24.79	-99.73	20	3.5	18 km al SUROESTE de LINARES, NL
45	23/07/2012	22:07:31	24.94	-99.67	20	3.6	13 km al NOROESTE de LINARES, NL
46	24/07/2012	6:03:49	24.8	-99.68	20	3.5	13 km al SUROESTE de LINARES, NL
47	24/07/2012	6:25:47	24.86	-99.59	38	3.4	2 km al OESTE de LINARES, NL
48	24/07/2012	7:48:30	24.83	-99.78	20	3.1	22 km al OESTE de LINARES, NL
49	24/07/2012	9:30:41	24.81	-99.81	20	3.3	25 km al OESTE de LINARES, NL
50	24/07/2012	11:27:18	24.85	-99.71	28	3.4	14 km al OESTE de LINARES, NL
51	24/07/2012	13:23:55	24.57	-99.62	20	3.5	32 km al SUR de LINARES, NL
52	24/07/2012	19:01:39	25.15	-99.12	20	3.2	55 km al NORESTE de LINARES, NL
53	24/07/2012	23:54:17	24.78	-99.78	4	3.6	23 km al SUROESTE de LINARES, NL
54	25/07/2012	1:22:26	24.94	-99.01	20	3.5	57 km al ESTE de LINARES, NL
55	25/07/2012	11:03:50	25.03	-99.07	20	3.4	54 km al NORESTE de LINARES, NL
56	25/07/2012	15:52:00	25.17	-99.12	20	3.5	56 km al NORESTE de LINARES, NL
57	25/07/2012	16:47:44	25.12	-99.14	20	3.4	52 km al NORESTE de LINARES, NL
58	25/07/2012	19:28:05	25.13	-99.22	20	3.5	46 km al NORESTE de LINARES, NL
59	29/07/2012	9:49:07	24.88	-99.71	20	3.5	15 km al OESTE de LINARES, NL
60	29/07/2012	10:35:27	25.1	-99.62	20	3.4	23 km al SURESTE de MONTEMORELOS, NL
61	29/07/2012	10:38:04	24.82	-99.71	20	3.5	15 km al OESTE de LINARES, NL
62	29/07/2012	11:41:06	24.82	-99.72	20	3.5	17 km al SUROESTE de LINARES, NL
63	29/07/2012	11:50:37	24.92	-99.25	20	3.4	33 km al ESTE de LINARES, NL
64	29/07/2012	18:39:27	24.9	-99.31	20	3.4	26 km al ESTE de LINARES, NL
65	29/07/2012	18:43:40	24.83	-99.68	20	3.5	12 km al OESTE de LINARES, NL
66	02/08/2012	1:53:43	24.78	-99.77	20	3.2	22 km al SUROESTE de LINARES, NL
67	02/08/2012	2:33:49	24.66	-99.67	20	2.9	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
68	02/08/2012	6:51:04	24.63	-99.63	20	2.9	26 km al SUR de LINARES, NL
69	02/08/2012	7:41:20	24.87	-99.8	20	2.9	24 km al OESTE de LINARES, NL
70	02/08/2012	8:29:50	24.8	-99.8	20	3	24 km al OESTE de LINARES, NL
71	02/08/2012	8:53:26	24.61	-99.37	20	3.3	34 km al SURESTE de LINARES, NL
72	02/08/2012	9:27:16	24.76	-99.76	20	2.9	23 km al SUROESTE de LINARES, NL
73	02/08/2012	12:11:50	24.61	-99.58	20	2.9	28 km al SUR de LINARES, NL
74	02/08/2012	19:36:45	24.75	-99.76	20	3	22 km al SUROESTE de LINARES, NL
75	03/08/2012	0:47:13	24.83	-99.8	20	2.9	24 km al OESTE de LINARES, NL
76	03/08/2012	0:51:11	24.82	-99.79	20	3	23 km al OESTE de LINARES, NL
77	03/08/2012	1:52:07	24.71	-99.74	20	2.9	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
78	03/08/2012	1:56:10	24.81	-99.79	20	2.9	23 km al OESTE de LINARES, NL
79	05/08/2012	1:54:56	24.76	-99.77	20	3	23 km al SUROESTE de LINARES, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
80	06/08/2012	3:10:57	24.76	-99.76	20	3	23 km al SUROESTE de LINARES, NL
81	06/08/2012	3:11:33	25.4	-99.25	2	3.5	69 km al NORESTE de LINARES, NL
82	06/08/2012	3:17:53	24.69	-99.73	20	3.3	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
83	09/08/2012	18:42:37	24.97	-99.77	20	3.2	24 km al NOROESTE de LINARES, NL
84	10/08/2012	6:28:40	24.73	-99.77	3	3.4	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
85	12/08/2012	22:10:30	24.8	-99.3	2	2.9	28 km al ESTE de LINARES, NL
86	03/09/2012	23:52:36	25.18	-99.15	20	3.6	56 km al NORESTE de LINARES, NL
87	07/09/2012	14:57:10	24.46	-98.28	10	3.5	44 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
88	14/09/2012	8:29:16	24.76	-99.86	20	3.5	32 km al SUROESTE de LINARES, NL
89	14/09/2012	8:54:36	24.78	-99.78	5	3.5	23 km al SUROESTE de LINARES, NL
90	14/09/2012	10:11:39	24.78	-99.79	4	3.2	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
91	14/09/2012	22:26:41	24.78	-99.78	10	3.3	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
92	15/09/2012	6:12:29	24.7	-99.72	13	3.6	24 km al SUROESTE de LINARES, NL
93	15/09/2012	9:39:17	24.78	-99.79	20	3.2	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
94	15/09/2012	13:28:06	27.09	-100.43	3	3.6	34 km al SUROESTE de ANAHUAC, NL
95	15/09/2012	13:31:13	24.81	-99.79	20	3.1	24 km al OESTE de LINARES, NL
96	15/09/2012	17:11:39	24.47	-99.79	20	3.4	49 km al SUROESTE de LINARES, NL
97	17/09/2012	3:22:20	24.81	-99.79	2	3.4	23 km al OESTE de LINARES, NL
98	11/10/2012	0:17:26	25.23	-99.21	5	3.4	54 km al NORESTE de LINARES, NL
99	11/10/2012	1:31:08	24.73	-99.73	12	3.6	22 km al SUROESTE de LINARES, NL
100	11/10/2012	1:50:29	25.24	-99.22	5	3.4	55 km al NORESTE de LINARES, NL
101	11/10/2012	5:22:36	25.17	-99.18	5	3.4	52 km al NORESTE de LINARES, NL
102	11/10/2012	6:40:29	24.83	-99.78	5	3.2	22 km al OESTE de LINARES, NL
103	11/10/2012	8:26:13	24.8	-99.75	5	3.3	19 km al SUROESTE de LINARES, NL
104	11/10/2012	12:44:52	24.69	-99.22	10	3	40 km al SURESTE de LINARES, NL
105	11/10/2012	18:45:42	25.17	-99.2	10	3.2	51 km al NORESTE de LINARES, NL
106	12/10/2012	7:21:14	25.15	-99.58	10	3	26 km al ESTE de MONTEMORELOS, NL
107	14/10/2012	4:13:59	24.7	-99.95	20	3.3	42 km al SUROESTE de LINARES, NL
108	26/10/2012	20:56:41	24.79	-99.93	8	3.2	37 km al OESTE de LINARES, NL
109	29/10/2012	0:47:39	25.07	-99.03	5	3.8	59 km al NORESTE de LINARES, NL
110	29/10/2012	10:34:08	24.81	-99.78	5	3.1	23 km al OESTE de LINARES, NL
111	31/10/2012	2:40:24	24.8	-99.81	5	3.4	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
112	31/10/2012	5:45:20	24.78	-99.8	5	3.4	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
113	31/10/2012	6:44:04	24.86	-99.82	5	3.3	25 km al OESTE de LINARES, NL
114	16/11/2012	6:29:19	25.01	-99.04	20	3.5	56 km al NORESTE de LINARES, NL
115	24/12/2012	8:37:48	25.16	-99.17	15	3.6	53 km al NORESTE de LINARES, NL
116	15/02/2013	17:53:27	25.81	-100.83	20	3.4	23 km al OESTE de GARCIA, NL
117	15/03/2013	17:41:50	25.82	-100.64	2	3.5	4 km al OESTE de GARCIA, NL
118	10/06/2013	15:24:32	25.18	-100.58	20	3.8	51 km al SURESTE de SALTILLO, COAH
119	18/06/2013	9:28:19	25.41	-99.48	2	3.8	43 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
120	18/06/2013	16:23:07	24.59	-98.68	5	3.8	60 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
121	25/06/2013	3:09:49	23.71	-99.97	5	4	69 km al ESTE de MATEHUALA, SLP
122	27/06/2013	20:38:45	24.38	-99.76	18	3.5	57 km al SUROESTE de LINARES, NL
123	27/06/2013	20:51:01	24.4	-99.79	18	3.6	56 km al SUROESTE de LINARES, NL
124	27/06/2013	23:18:17	24.38	-99.77	18	3.5	57 km al SUROESTE de LINARES, NL
125	24/07/2013	14:59:31	25.74	-100.46	5	3.7	17 km al NOROESTE de MONTERREY, NL
126	26/07/2013	18:23:16	25.74	-100.47	4	3.3	7 km al NORTE de CD STA CATARINA, NL
127	27/07/2013	1:23:26	24.76	-99.79	3	3.4	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
128	27/07/2013	3:47:29	25.26	-99.96	16	3.8	7 km al SURESTE de CD DE ALLENDE, NL
129	22/08/2013	11:10:19	25.31	-98.55	20	3.8	64 km al NOROESTE de SAN FERNANDO, TAM
130	21/09/2013	21:28:41	24.03	-100.34	20	3.9	52 km al NORESTE de MATEHUALA, SLP
131	22/09/2013	5:29:10	24.59	-100.64	16	3.7	99 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
132	07/10/2013	0:03:39	25.91	-99.47	16	4.1	64 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
133	20/10/2013	23:12:52	25.47	-99.58	14	3.9	40 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
134	20/10/2013	23:26:34	25.66	-99.57	5	3.4	44 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
135	21/10/2013	11:14:07	25.54	-99.47	5	3.7	53 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
136	21/10/2013	11:35:19	25.56	-99.43	9	3.8	57 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
137	21/10/2013	22:24:32	25.69	-99.13	16	3.8	79 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
138	22/10/2013	0:21:47	25.52	-99.41	5	3.6	55 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
139	22/10/2013	15:47:51	25.79	-99.08	10	3.5	68 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
140	23/10/2013	2:02:23	25.5	-99.48	10	3.7	49 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
141	26/10/2013	20:06:15	25.53	-99.48	15	3.6	51 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
142	26/10/2013	20:38:49	24.67	-100.25	20	3.4	71 km al SUROESTE de MONTEMORELOS, NL
143	26/10/2013	20:54:12	25.58	-99.15	17	3.5	81 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
144	27/10/2013	15:39:40	25.45	-99.58	5	3.9	39 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
145	28/10/2013	16:02:49	25.5	-99.5	2	3.7	48 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
146	28/10/2013	16:30:36	25.51	-99.58	2	3.5	43 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
147	28/10/2013	16:31:50	25.53	-99.4	1	3.6	57 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
148	30/10/2013	4:34:21	25.63	-99.33	15	3.7	68 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
149	31/10/2013	13:21:02	25.65	-99.07	20	3.5	80 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
150	03/11/2013	0:04:08	25.58	-99.53	20	3.6	48 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
151	03/11/2013	22:48:42	24.69	-100.2	20	3.3	67 km al SUROESTE de LINARES, NL
152	03/11/2013	23:18:23	25.6	-99.48	18	3.4	52 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
153	04/11/2013	2:18:25	25.67	-99.19	18	3.4	82 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
154	04/11/2013	5:03:21	25.61	-99.19	10	3.4	80 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
155	04/11/2013	14:32:09	25.74	-98.88	20	3.5	61 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
156	06/11/2013	0:11:03	25.45	-99.48	2	3.6	45 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
157	06/11/2013	19:22:44	25.65	-99.08	20	3.6	81 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
158	07/11/2013	14:32:55	25.62	-99.25	20	3.6	76 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
159	11/11/2013	6:15:19	25.7	-99.24	18	3.6	78 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
160	14/11/2013	5:27:14	25.49	-99.41	20	3.8	54 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
161	15/11/2013	4:54:47	25.36	-98.89	20	3.7	88 km al NORESTE de LINARES, NL
162	15/11/2013	13:54:58	25.23	-100.11	10	3.5	11 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
163	17/11/2013	7:50:04	25.53	-99.88	20	3.8	14 km al SURESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
164	17/11/2013	8:03:23	25.59	-99.52	20	3.6	49 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
165	17/11/2013	9:04:12	25.58	-99.55	20	3.4	45 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
166	17/11/2013	11:36:53	25.57	-99.26	20	3.4	71 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
167	17/11/2013	14:36:28	25.57	-99.44	20	3.3	56 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
168	18/11/2013	0:02:51	25.59	-99.55	20	3.5	45 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
169	18/11/2013	0:42:46	25.54	-99.28	20	2.9	67 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
170	18/11/2013	2:57:53	25.58	-99.53	20	3.4	47 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
171	18/11/2013	13:39:20	25.39	-99.81	5	3.5	22 km al NORTE de MONTEMORELOS, NL
172	19/11/2013	12:35:37	25.66	-99.16	18	3.5	83 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
173	20/11/2013	10:14:02	25.34	-99.5	71	3.7	37 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
174	21/11/2013	11:45:56	25.47	-99.54	5	3.3	43 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
175	23/11/2013	20:00:26	25.51	-99.39	10	3.4	57 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
176	25/11/2013	16:25:56	25.53	-99.45	10	4	54 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
177	26/11/2013	1:13:58	25.65	-99.23	15	4.5	77 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
178	27/11/2013	23:13:00	25.65	-99.21	20	3.4	80 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
179	29/11/2013	20:23:49	25.6	-99.33	20	4	67 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
180	29/11/2013	21:26:20	25.7	-99.18	16	3.7	79 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
181	02/12/2013	15:50:42	26	-99.04	18	3.6	45 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
182	02/12/2013	16:26:02	25.73	-99.16	18	3.4	76 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
183	03/12/2013	9:56:56	25.58	-99.1	16	3.2	85 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
184	03/12/2013	10:46:52	25.59	-99.01	12	3.3	82 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
185	03/12/2013	13:10:34	25.48	-99.42	5	3.5	53 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
186	04/12/2013	2:50:48	25.49	-99.61	2	3.7	40 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
187	04/12/2013	12:28:50	25.49	-99.43	4	3.6	53 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
188	04/12/2013	12:41:51	25.84	-98.74	16	3.6	46 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
189	04/12/2013	13:17:29	24.97	-99.4	1	1.9	21 km al NORESTE de LINARES, NL
190	04/12/2013	13:17:55	24.96	-99.37	1	2.5	23 km al NORESTE de LINARES, NL
191	05/12/2013	2:47:01	24.97	-99.4	1	3.1	20 km al NORESTE de LINARES, NL
192	05/12/2013	23:17:51	25.52	-99.43	4	3.7	54 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
193	07/12/2013	17:31:59	25.36	-99.92	5	3.3	13 km al NORESTE de CD DE ALLENDE, NL
194	09/12/2013	18:31:17	25.47	-99.37	5	2.8	55 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
195	11/12/2013	10:03:28	25.48	-99.52	5	3.4	45 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
196	11/12/2013	16:06:56	25.41	-99.79	5	3.4	25 km al NORTE de MONTEMORELOS, NL
197	11/12/2013	16:10:04	25.43	-99.81	5	3.2	26 km al SURESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
198	15/12/2013	10:28:07	25.5	-99.53	3	3.8	46 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
199	19/12/2013	21:34:23	25.51	-99.43	5	3.6	54 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
200	20/12/2013	11:38:59	25.92	-100.52	84	3.6	9 km al SUROESTE de HIDALGO, NL
201	20/12/2013	13:17:45	25.65	-99.28	20	3.3	73 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
202	22/12/2013	5:52:26	25.6	-99.39	20	4	62 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
203	05/01/2014	10:54:15	25.49	-99.32	5	3.4	61 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
204	05/01/2014	11:41:34	25.5	-99.55	5	3.7	45 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
205	06/01/2014	19:27:27	25.36	-100.02	20	3.5	8 km al NORTE de CD DE ALLENDE, NL
206	06/01/2014	19:34:47	24.68	-100.2	20	3.6	67 km al SUROESTE de LINARES, NL
207	07/01/2014	3:30:29	25.54	-99.84	20	3.5	17 km al SURESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
208	07/01/2014	9:10:19	25.39	-99.45	71	3.4	44 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
209	08/01/2014	11:28:16	23.97	-99.21	20	3.4	27 km al NORTE de CD VICTORIA, TAM
210	08/01/2014	11:49:04	25.52	-99.29	5	3.4	66 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
211	14/01/2014	15:10:35	24.86	-98.51	5	3.2	36 km al OESTE de SAN FERNANDO, TAM
212	14/01/2014	16:52:34	25.69	-99.24	5	3.1	77 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
213	21/01/2014	3:33:06	25.5	-99.53	5	3.4	46 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
214	22/01/2014	9:33:40	25.62	-99.29	20	3.6	72 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
215	30/01/2014	7:52:50	25.68	-99.22	15	3.6	79 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
216	02/02/2014	19:10:20	25.9	-99.06	20	3.7	55 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
217	05/02/2014	12:13:42	25.13	-97.31	3	3.9	79 km al SURESTE de VALLE HERMOSO, TAM
218	05/02/2014	12:20:12	24.58	-98.3	4	3.6	33 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
219	10/02/2014	22:14:51	25.46	-99.56	2	3.9	40 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
220	13/02/2014	1:51:33	25.51	-99.51	3	3.6	48 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
221	13/02/2014	1:59:24	25.47	-99.79	5	3.4	25 km al SURESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
222	17/02/2014	12:35:14	24.7	-100.47	6	3.5	79 km al SUROESTE de CD DE ALLENDE, NL
223	19/02/2014	13:32:47	25.66	-99.16	18	3.4	82 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
224	20/02/2014	22:58:25	25.88	-99.09	20	3.9	58 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
225	25/02/2014	20:17:33	25.68	-99.25	18	3.3	76 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
226	26/02/2014	3:31:21	25.65	-99.19	16	3.2	81 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
227	01/03/2014	0:23:20	25.63	-99.24	3	3	77 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
228	01/03/2014	21:18:34	25.67	-99.17	3	3.5	82 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
229	02/03/2014	11:30:16	25.52	-99.59	5	4.3	42 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
230	02/03/2014	14:50:10	25.57	-99.27	16	3.4	70 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
231	02/03/2014	19:41:50	25.68	-99.16	15	3.4	81 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
232	02/03/2014	23:00:42	25.46	-99.48	5	3.4	46 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
233	03/03/2014	1:35:26	25.47	-99.5	5	3.7	45 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
234	03/03/2014	1:57:42	25.36	-99.63	5	3.5	28 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
235	03/03/2014	2:29:26	25.46	-99.56	5	3.6	40 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
236	03/03/2014	15:52:55	25.73	-99.22	15	3.3	76 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
237	04/03/2014	4:36:41	25.68	-99.08	16	3.5	78 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
238	04/03/2014	4:40:06	25.65	-99.22	16	3.4	79 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
239	04/03/2014	5:03:54	25.51	-99.45	5	3.9	53 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
240	04/03/2014	6:44:16	25.38	-99.5	76	3.5	40 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
241	05/03/2014	8:40:32	25.5	-99.59	3	4.2	42 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
242	07/03/2014	13:09:51	25.62	-99.21	16	3.6	79 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
243	09/03/2014	7:13:20	24.51	-100.39	10	3.9	92 km al SUROESTE de LINARES, NL
244	10/03/2014	2:51:32	25.41	-99.58	5	3.5	35 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
245	10/03/2014	16:50:03	25.64	-99.17	16	3.5	82 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
246	11/03/2014	8:28:41	25.51	-99.67	5	4	35 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
247	11/03/2014	17:44:48	25.33	-99.59	68	3.6	29 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
248	13/03/2014	14:36:05	25.68	-99.18	15	3.4	81 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
249	14/03/2014	16:03:43	25.58	-99.27	16	3.5	71 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
250	17/03/2014	4:08:31	25.52	-99.54	5	3.7	47 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
251	17/03/2014	10:32:54	25.52	-99.55	5	3.6	46 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
252	17/03/2014	16:34:32	25.07	-100.02	5	3.6	23 km al SUROESTE de MONTEMORELOS, NL
253	17/03/2014	18:53:14	25.46	-99.64	10	3.4	36 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
254	18/03/2014	17:41:58	25.45	-99.6	1	4.2	37 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
255	18/03/2014	17:50:45	25.66	-99.14	20	3.5	83 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
256	28/03/2014	3:41:02	25.57	-99.54	10	3.7	46 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
257	31/03/2014	20:41:56	25.5	-99.5	2	3.8	48 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
258	02/04/2014	13:06:10	25.46	-99.58	5	4.1	43 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
259	02/04/2014	15:05:49	25.51	-99.48	5	4	82 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
260	04/04/2014	10:31:50	25.18	-99.49	5	3.5	33 km al ESTE de MONTEMORELOS, NL
261	07/04/2014	17:11:44	25.47	-99.59	1	3.9	39 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
262	07/04/2014	19:57:05	25.47	-99.59	1	3.7	39 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
263	11/04/2014	22:02:13	25.58	-99.64	5	3.5	36 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
264	13/04/2014	21:02:56	24.75	-99.78	5	3.3	25 km al SUROESTE de LINARES, NL
265	25/04/2014	19:24:44	25.75	-99.25	5	3.4	75 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
266	28/04/2014	12:06:30	24.87	-99.67	3	3	10 km al OESTE de LINARES, NL
267	04/05/2014	2:08:04	22.73	-99.67	10	3.8	71 km al NORESTE de CERRITOS, SLP
268	04/05/2014	15:16:57	24.27	-100.06	11	4	82 km al SUROESTE de LINARES, NL
269	08/05/2014	16:35:10	26.05	-99.92	5	3.7	26 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
270	12/05/2014	2:43:19	25.66	-99.29	5	3.3	72 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
271	15/05/2014	12:39:19	24.95	-98.43	5	3.4	30 km al NOROESTE de SAN FERNANDO, TAM
272	19/05/2014	7:45:16	25.89	-99.1	18	3.8	56 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
273	19/05/2014	8:29:17	25.8	-99.13	17	3.5	67 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
274	19/05/2014	8:38:23	25.74	-98.8	16	3.5	58 km al SUROESTE de CD GVO DIAZ ORDAZ, TAM
275	21/05/2014	12:05:02	26.12	-99.58	5	3.3	61 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
276	28/05/2014	1:50:04	22.44	-99.22	5	3.8	42 km al SUROESTE de CD MANTE, TAM
277	03/06/2014	13:54:07	26.12	-99.96	5	3.8	28 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
278	03/06/2014	17:46:21	25.35	-99.39	5	3.3	48 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
279	04/06/2014	0:57:32	25.69	-99.5	5	3.5	51 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
280	09/06/2014	22:47:44	25.7	-99.74	5	3.9	29 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
281	09/06/2014	22:51:35	25.81	-99.57	5	3.7	50 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
282	15/06/2014	20:49:10	26.02	-99.15	20	3.8	44 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
283	28/06/2014	19:24:02	25.53	-99.4	10	3.7	57 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
284	04/07/2014	17:54:42	25.86	-100.62	20	3.4	5 km al NOROESTE de GARCIA, NL
285	13/07/2014	17:21:35	25.49	-99.47	2	3.5	49 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
286	14/07/2014	6:39:32	25.55	-99.41	10	3.7	58 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
287	19/07/2014	12:55:14	23.15	-98.13	20	3.7	26 km al NORTE de ALDAMA, TAM
288	22/07/2014	11:01:38	24.57	-98.56	5	3.5	52 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
289	31/07/2014	18:00:45	25.9	-100.3	5	3.5	11 km al NORESTE de CD GRAL ESCOBEDO, NL
290	08/08/2014	7:18:31	25.52	-99.55	5	3.5	46 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
291	08/08/2014	19:37:00	25.31	-100.75	20	3.8	28 km al SURESTE de SALTILLO, COAH
292	08/08/2014	20:28:42	25.77	-99.12	20	3.5	70 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
293	09/08/2014	1:56:09	25.87	-99.7	20	3.5	43 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
294	11/08/2014	9:26:46	22.46	-99.33	5	3.6	48 km al SUROESTE de CD MANTE, TAM
295	18/08/2014	17:09:58	24.59	-98.91	5	3.2	73 km al SURESTE de LINARES, NL
296	24/08/2014	6:26:03	25.65	-99.21	10	3.7	79 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
297	24/08/2014	6:29:29	25.67	-99.22	10	3.4	79 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
298	27/08/2014	14:07:00	25.74	-99.24	5	3.6	76 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
299	31/08/2014	5:08:29	25.3	-99.62	16	3.7	24 km al NORESTE de MONTEMORELOS, NL
300	02/09/2014	14:26:14	23.03	-98.74	79	3.7	39 km al NOROESTE de GONZALEZ, TAM
301	09/09/2014	14:01:18	26.05	-99.88	5	3.5	31 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
302	09/09/2014	23:35:24	25.56	-99.68	15	3.4	32 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
303	09/09/2014	23:39:02	25.52	-99.55	2	3.6	46 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
304	22/09/2014	23:19:34	23.41	-99.47	10	3.7	49 km al SUROESTE de CD VICTORIA, TAM
305	14/11/2014	14:08:57	24.78	-98.56	3	3.6	41 km al OESTE de SAN FERNANDO, TAM
306	14/11/2014	14:45:26	24.75	-98.82	3	3.8	68 km al OESTE de SAN FERNANDO, TAM
307	03/12/2014	5:19:07	23.32	-99.46	8	3.7	56 km al SUROESTE de CD VICTORIA, TAM
308	22/12/2014	12:37:12	25.82	-100.37	5	3.4	4 km al NOROESTE de CD GRAL ESCOBEDO, NL
309	23/12/2014	10:06:02	24.59	-101.62	71	4.3	110 km al SURESTE de PARRAS DE LA FUENTE, COAH
310	30/12/2014	2:56:54	23.77	-99.14	3	3.6	3 km al NORESTE de CD VICTORIA, TAM
311	30/12/2014	12:16:43	26.12	-100.35	12	3.9	19 km al NORESTE de HIDALGO, NL
312	04/01/2015	23:40:20	24.97	-99.75	5	2.9	22 km al NOROESTE de LINARES, NL
313	04/01/2015	23:42:38	25.84	-99.58	5	3.6	50 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
314	05/01/2015	23:43:08	25.96	-99.54	18	3.7	62 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
315	15/01/2015	3:36:10	25.71	-99.19	18	3.3	78 km al SUR de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
316	18/01/2015	12:41:56	25.78	-100.8	3	3.4	21 km al OESTE de GARCIA, NL
317	18/01/2015	16:36:50	25.15	-98.47	3	3.7	46 km al NOROESTE de SAN FERNANDO, TAM
318	19/01/2015	13:42:37	24.64	-98.75	3	3.5	64 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
319	20/01/2015	15:46:18	26.43	-99.78	3	3.3	41 km al ESTE de CD SABINAS HIDALGO, NL

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
320	21/01/2015	14:25:02	26.1	-99.47	3	3.3	55 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
321	23/01/2015	20:57:34	23.13	-98.79	5	3.7	46 km al NORESTE de CD MANTE, TAM
322	26/01/2015	13:23:14	26.05	-99.69	3	3.2	49 km al ESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
323	27/01/2015	14:19:15	26.06	-99.45	3	3.3	56 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM
324	27/01/2015	16:47:17	26.16	-100.38	3	3.3	22 km al NORESTE de HIDALGO, NL
325	28/01/2015	2:06:25	24.97	-99.38	20	3.3	22 km al NORESTE de LINARES, NL
326	29/01/2015	20:04:21	24.28	-99.76	20	3.4	67 km al SUROESTE de LINARES, NL
327	30/01/2015	14:30:00	25.58	-100.08	20	3.7	7 km al SUR de CD BENITO JUAREZ, NL
328	30/01/2015	17:09:18	25.7	-100.55	20	3.8	10 km al OESTE de CD STA CATARINA, NL
329	30/01/2015	21:07:46	24.57	-99.82	20	3.5	41 km al SUROESTE de LINARES, NL
330	02/02/2015	19:30:30	25.31	-99.96	3	3.5	6 km al NORESTE de CD DE ALLENDE, NL
331	03/02/2015	2:22:58	25.03	-99.62	3	3.1	20 km al NOROESTE de LINARES, NL
332	03/02/2015	2:37:36	24.99	-99.65	3	3.5	17 km al NOROESTE de LINARES, NL
333	05/02/2015	7:38:33	25.14	-99.57	3	3	26 km al ESTE de MONTEMORELOS, NL
334	05/02/2015	17:01:37	25.56	-100.71	5	3.6	24 km al ESTE de RAMOS ARIZPE, COAH
335	06/02/2015	13:56:15	26.04	-100	3	3.4	19 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
336	10/02/2015	12:17:58	28	-101.53	5	2.5	13 km al NORTE de CD MELCHOR MUZQUIZ, COAH
337	10/02/2015	15:04:19	27.95	-101.51	20	2.9	9 km al NORTE de CD MELCHOR MUZQUIZ, COAH
338	12/02/2015	12:03:30	27.77	-101.41	10	2.5	14 km al SUR de PALAU, COAH
339	12/02/2015	14:24:04	24.84	-98.54	3	3.6	38 km al OESTE de SAN FERNANDO, TAM
340	17/02/2015	12:20:06	27.95	-101.39	3	2.8	7 km al NORESTE de PALAU, COAH
341	20/02/2015	1:10:31	24.43	-100.32	5	3.3	90 km al SUROESTE de LINARES, NL
342	23/03/2015	13:09:52	25.38	-100.72	3	3.5	29 km al SURESTE de RAMOS ARIZPE, COAH
343	12/04/2015	6:07:32	25	-102.15	5	4.2	49 km al SUR de PARRAS DE LA FUENTE, COAH
344	15/04/2015	16:28:11	24.84	-99.65	3	3.4	9 km al SUROESTE de LINARES, NL
345	23/04/2015	19:37:53	25.93	-99.78	17	3.4	39 km al ESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
346	27/04/2015	3:07:22	22.65	-99.54	5	3.9	60 km al OESTE de CD MANTE, TAM
347	17/05/2015	22:07:07	25.73	-101.71	3	3.9	58 km al NORESTE de PARRAS DE LA FUENTE, COAH
348	19/05/2015	14:03:57	26.21	-99.9	3	3.4	39 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
349	25/05/2015	15:19:57	27.95	-101.38	2	2.8	7 km al NORESTE de PALAU, COAH
350	29/05/2015	16:18:36	24.07	-98.66	10	3.7	61 km al NORESTE de CD VICTORIA, TAM
351	31/05/2015	23:34:17	25.25	-101.15	20	4	26 km al SUROESTE de SALTILLO, COAH
352	02/06/2015	18:45:13	27.77	-101.35	5	2.5	15 km al SURESTE de PALAU, COAH
353	03/06/2015	14:44:15	23.41	-98.92	3	3.2	43 km al SURESTE de CD VICTORIA, TAM
354	04/06/2015	16:26:43	26.19	-99.62	3	3.7	60 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
355	05/06/2015	7:26:28	27.753	-101.352	5	2.6	17 km al SURESTE de PALAU, COAH
356	09/06/2015	17:49:01	27.75	-101.31	2	3	19 km al SURESTE de PALAU, COAH
357	09/06/2015	22:13:02	25.76	-99.47	10	3.6	56 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
358	09/06/2015	22:29:13	25.78	-99.42	20	3.5	62 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
359	09/06/2015	23:06:59	25.97	-99.25	15	3.5	52 km al SUROESTE de CD MIGUEL ALEMAN, TAM

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – Continuación...

Evento	Fecha	Hora local	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitud	Zona
360	09/06/2015	23:07:02	25.75	-99.36	15	3.5	66 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
361	10/06/2015	4:17:21	25.82	-99.51	20	3	56 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
362	10/06/2015	13:01:33	24.69	-98.78	3	3.6	66 km al SUROESTE de SAN FERNANDO, TAM
363	10/06/2015	15:51:53	25.62	-99.59	3	3.3	42 km al ESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
364	10/06/2015	15:53:45	25.25	-100.52	20	3.2	42 km al SUROESTE de SANTIAGO, NL
365	13/06/2015	2:19:36	25.78	-99.78	3	3.4	30 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
366	14/06/2015	18:17:48	27.96	-101.44	12	2.9	8 km al NORTE de PALAU, COAH
367	22/06/2015	18:03:51	25.21	-100.47	5	3.4	40 km al SUROESTE de SANTIAGO, NL
368	01/07/2015	18:25:46	24.63	-99.83	3	3.3	37 km al SUROESTE de LINARES, NL
369	13/07/2015	23:18:16	22.52	-100.05	14	3.9	26 km al NORESTE de CERRITOS, SLP
370	18/07/2015	11:12:18	27.01	-102.66	20	3.8	111 km al OESTE de SAN BUENAVENTURA, COAH
371	25/07/2015	3:02:42	25.99	-100.25	3	3.8	9 km al NOROESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
372	31/07/2015	17:45:31	25.35	-100.84	3	3.6	19 km al SURESTE de SALTILLO, COAH
373	04/08/2015	4:43:14	23.94	-100.09	5	4.1	65 km al NORESTE de MATEHUALA, SLP
374	07/08/2015	14:10:18	23.99	-100.1	7	3.9	67 km al NORESTE de MATEHUALA, SLP
375	17/08/2015	15:05:34	27.98	-101.43	3	3.1	10 km al NORTE de PALAU, COAH
376	25/08/2015	20:36:20	22.65	-99.78	10	4.2	57 km al NORESTE de CERRITOS, SLP
377	15/10/15	19:49:17	23.3	-101.15	10	4	19 KM AL NORTE DE CHARCAS, SLP
378	2015-11-07	18:22:13	26.21	-100.1	2	3.4	30 km al NORTE de CIENEGA DE FLORES, NL
379	2015-11-17	21:11:12	25.86	-99.51	23	3.5	58 km al NORESTE de CADEREYTA JIMENEZ, NL
380	2015-12-14	16:18:29	26.11	-99.79	10	3.5	42 km al NORESTE de CIENEGA DE FLORES, NL
381	2015-12-31	12:23:55	25.23	-99.17	20	3.5	57 km al NORESTE de LINARES, NL

Apéndice B

Coordenadas de la relocalización y valores de M_L para los sismos de la base de datos

Tabla B.1: Coordenadas de la relocalización y valores de M_L para los 381 sismos de la base de datos. Se incluyen 49 eventos (ver capítulo 3) relocalizados en el trabajo de [Gómez-Arredondo \(2014\)](#), los cuales se muestran con un asterisco (*).

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
1	17/04/2006	11:25:10	24.208	-100.221	4.6
2	17/04/2006	11:58:04	24.364	-100.192	3.8
3	23/09/2008	20:46:05	22.715	-97.657	3.2
4	30/10/2008	19:45:27	22.597	-101.525	3.1
5	14/06/2009	6:04:06	25.188	-99.783	4.5
6	20/06/2009	3:56:16	24.887	-100.258	3.7
7	20/06/2009	3:57:50	24.908	-100.216	3.8
8	21/06/2009	21:08:06	24.861	-100.256	3.5
9	20/01/2010	15:56:28	25.402	-100.671	4.1
10	13/02/2010	17:52:30	25.419	-97.9	3
11	26/05/2010	3:11:47	24.07	-100.172	3.3
12	15/06/2010	11:28:41	25.197	-99.765	3.2
13	30/08/2010	5:43:00	24.799	-99.797	3.6
14	08/09/2010	12:46:05	24.677	-98.425	3.2
15	03/10/2010	22:16:36	25.198	-99.768	2.7
16	05/10/2010	3:24:45	22.977	-99.262	3
17	30/12/2010	3:17:08	22.141	-97.376	3.1
18	12/02/2011	19:19:20	25.661	-101.129	3.5
19	26/07/2011	21:28:00	27.708	-101.698	3.3
20	30/08/2011	4:24:25	24.873	-99.46	2.3
21	01/09/2011	22:09:35	25.193	-99.778	3.4
22	04/09/2011	5:47:03	24.227	-100.045	2.9
23	08/03/2012	16:39:00	24.682	-98.449	3.5
24	18/04/2012	15:10:29	22.885	-100.299	3.8
25	20/05/2012	23:22:28	25.111	-100.003	2.9
26	21/05/2012	6:03:20	25.099	-100.01	3.7
27	21/05/2012	7:38:51	25.103	-100.008	2.9
28	28/05/2012	19:27:20	24.729	-99.085	4.5

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
29	24/06/2012	20:52:52	23.218	-99.364	3.2
30	06/07/2012	15:17:13	26.279	-99.777	2.5
31	11/07/2012	18:21:18	26.075	-100.574	2.4
32	15/07/2012	19:46:01	24.782	-99.779	3.1
33	21/07/2012	13:32:07	24.704	-99.737	2.5
34	22/07/2012	9:58:17	24.895	-99.806	2.4
35	22/07/2012	10:07:25	24.803	-99.797	2.7
36	22/07/2012	12:31:32	24.795	-99.795	2.4
37	22/07/2012	14:06:21	24.649	-99.685	2.5
38	23/07/2012	3:27:12	24.777	-99.789	3.5
39	23/07/2012	5:11:00	24.808	-99.806	2.3
40	23/07/2012	6:24:32	24.787	-99.797	2.4
41	23/07/2012	11:09:41	24.753	-99.756	3.4
42	23/07/2012	12:34:14	24.774	-99.787	3.5
43	23/07/2012	12:41:35	24.835	-99.799	2.5
44	23/07/2012	20:16:31	24.77	-99.779	2.9
45	23/07/2012	22:07:31	24.777	-99.79	3.3
46	24/07/2012	6:03:49	24.759	-99.793	3.5
47	24/07/2012	6:25:47	24.78	-99.797	2.7
48	24/07/2012	7:48:30	24.822	-99.797	2.4
49	24/07/2012	9:30:41	24.796	-99.802	2.6
50	24/07/2012	11:27:18	24.806	-99.806	2.7
51	24/07/2012	13:23:55	24.79	-99.789	3
52	24/07/2012	19:01:39	24.772	-99.793	2.7
53	24/07/2012	23:54:17	24.754	-99.786	3.2
54	25/07/2012	1:22:26	24.733	-99.782	2.8
55	25/07/2012	11:03:50	24.767	-99.792	2.8
56	25/07/2012	15:52:00	24.755	-99.788	3.8
57	25/07/2012	16:47:44	24.742	-99.781	2.8
58	25/07/2012	19:28:05	24.76	-99.79	3.2
59	29/07/2012	9:49:07	24.761	-99.781	4.1
60	29/07/2012	10:35:27	24.813	-99.797	2.5
61	29/07/2012	10:38:04	24.765	-99.777	3
62	29/07/2012	11:41:06	24.782	-99.793	2.5
63	29/07/2012	11:50:37	24.74	-99.767	2.9
64	29/07/2012	18:39:27	24.776	-99.788	3.3
65	29/07/2012	18:43:40	24.786	-99.794	3
66*	02/08/2012	1:53:43	24.7566667	-99.7755	4.3
67*	02/08/2012	2:33:49	24.7516667	-99.7716667	2.5
68*	02/08/2012	6:51:04	24.671	-99.7123333	2.2
69*	02/08/2012	7:41:20	24.7375	-99.766	2.9
70*	02/08/2012	8:29:50	24.8195	-99.8043333	2.9
71*	02/08/2012	8:53:26	24.766	-99.7866667	3.9
72*	02/08/2012	9:27:16	24.8333333	-99.8066667	2.5
73*	02/08/2012	12:11:50	24.6256667	-99.6386667	2
74*	02/08/2012	19:36:45	24.8011667	-99.6693333	2.4
75*	03/08/2012	0:47:13	24.7848333	-99.7845	2.5
76*	03/08/2012	0:51:11	24.7915	-99.7871667	2.7
77*	03/08/2012	1:52:07	24.7548333	-99.7783333	2.8
78*	03/08/2012	1:56:10	24.6935	-99.7285	2.5
79*	05/08/2012	1:54:56	24.7488333	-99.7748333	3.1
80*	06/08/2012	3:10:57	24.7303333	-99.7648333	2.9
81*	06/08/2012	3:11:33	25.4883333	-99.0543333	3.2
82*	06/08/2012	3:17:53	24.7895	-99.7911667	3.1
83*	09/08/2012	18:42:37	24.7481667	-99.7576667	2.8
84*	10/08/2012	6:28:40	24.7795	-99.7861667	3.2
85*	12/08/2012	22:10:30	24.9401667	-99.3943333	2.8
86*	03/09/2012	23:52:36	24.6853333	-99.69	3.2
87	07/09/2012	14:57:10	24.65	-98.446	3.2
88*	14/09/2012	8:29:16	24.7233333	-99.7391667	3.1
89*	14/09/2012	8:54:36	24.6288333	-99.6198333	3.5

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
90*	14/09/2012	10:11:39	24.6281667	-99.6151667	2.8
91*	14/09/2012	22:26:41	24.7875	-99.805	2.6
92*	15/09/2012	6:12:29	24.6956667	-99.7	3.3
93*	15/09/2012	9:39:17	24.7695	-99.7985	2.6
94*	15/09/2012	13:28:06	27.2205	-100.582333	3.2
95*	15/09/2012	13:31:13	24.735	-99.7575	2.5
96*	15/09/2012	17:11:39	24.4505	-99.7458333	3
97*	17/09/2012	3:22:20	24.6226667	-99.603	2.7
98*	11/10/2012	0:17:26	24.7498333	-99.76	2.4
99*	11/10/2012	1:31:08	24.636	-99.6131667	3.3
100*	11/10/2012	1:50:29	24.6843333	-99.6718333	2.7
101*	11/10/2012	5:22:36	24.6115	-99.5723333	2.5
102*	11/10/2012	6:40:29	24.6793333	-99.6665	2.7
103*	11/10/2012	8:26:13	24.642	-99.6103333	2.8
104*	11/10/2012	12:44:52	24.6203333	-99.597	3
105*	11/10/2012	18:45:42	24.6836667	-99.6833333	3.6
106*	12/10/2012	7:21:14	25.081	-99.4173333	3
107*	14/10/2012	4:13:59	24.4791667	-99.692	2.5
108*	26/10/2012	20:56:41	24.5156667	-99.7383333	2.5
109*	29/10/2012	0:47:39	24.6556667	-99.6658333	3.8
110*	29/10/2012	10:34:08	24.7891667	-99.9156667	2.7
111*	31/10/2012	2:40:24	24.7088333	-99.7643333	3.1
112*	31/10/2012	5:45:20	24.7676667	-99.833	2.8
113*	31/10/2012	6:44:04	24.7971667	-99.8355	2.8
114*	16/11/2012	6:29:19	24.7908333	-99.7956667	3.4
115*	24/12/2012	8:37:48	24.7015	-99.7583333	3
116	15/02/2013	17:53:27	25.759	-100.879	3
117	15/03/2013	17:41:50	25.934	-100.748	2.6
118	10/06/2013	15:24:32	23.659	-100.159	2.9
119	18/06/2013	9:28:19	25.194	-99.772	3.4
120	18/06/2013	16:23:07	24.542	-98.589	3
121	25/06/2013	3:09:49	23.505	-99.893	3.7
122	27/06/2013	20:38:45	24.672	-99.953	2.9
123	27/06/2013	20:51:01	24.738	-99.977	2.9
124	27/06/2013	23:18:17	24.656	-99.938	3
125	24/07/2013	14:59:31	25.597	-100.805	3.5
126	26/07/2013	18:23:16	25.886	-100.759	3.3
127	27/07/2013	1:23:26	24.765	-99.801	2.6
128	27/07/2013	3:47:29	25.226	-99.964	2.4
129	22/08/2013	11:10:19	24.613	-98.48	3.2
130	21/09/2013	21:28:41	24.059	-100.582	3.3
131	22/09/2013	5:29:10	24.578	-100.531	3.2
132	07/10/2013	0:03:39	25.545	-100.51	3.1
133	20/10/2013	23:12:52	25.606	-99.508	3.6
134	20/10/2013	23:26:34	25.601	-99.57	3.1
135	21/10/2013	11:14:07	25.579	-99.579	3.2
136	21/10/2013	11:35:19	25.612	-99.426	3.7
137	21/10/2013	22:24:32	25.56	-99.759	3.3
138	22/10/2013	0:21:47	25.573	-99.589	3.1
139	22/10/2013	15:47:51	25.582	-99.577	2.9
140	23/10/2013	2:02:23	25.606	-99.518	3.1
141	26/10/2013	20:06:15	25.575	-99.564	3.2
142	26/10/2013	20:38:49	24.47	-98.814	2.9
143	26/10/2013	20:54:12	25.601	-99.432	3.1
144	27/10/2013	15:39:40	25.599	-99.51	4
145	28/10/2013	16:02:49	25.605	-99.479	3.8
146	28/10/2013	16:30:36	25.59	-99.635	3.5
147	28/10/2013	16:31:50	25.596	-99.588	3.9
148	30/10/2013	4:34:21	25.626	-99.512	2.8
149	31/10/2013	13:21:02	24.191	-99.578	3
150	03/11/2013	0:04:08	25.61	-99.511	3.7

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
151	03/11/2013	22:48:42	25.589	-99.592	2.7
152	03/11/2013	23:18:23	25.591	-99.568	2.9
153	04/11/2013	2:18:25	25.582	-99.607	2.9
154	04/11/2013	5:03:21	25.581	-99.485	2.8
155	04/11/2013	14:32:09	26.058	-100.051	3
156	06/11/2013	0:11:03	25.582	-99.554	3.1
157	06/11/2013	19:22:44	25.591	-99.507	2.9
158	07/11/2013	14:32:55	25.59	-99.549	3.2
159	11/11/2013	6:15:19	25.595	-99.587	3
160	14/11/2013	5:27:14	25.547	-99.747	3
161	15/11/2013	4:54:47	25.61	-99.422	3.1
162	15/11/2013	13:54:58	24.601	-100.294	3
163	17/11/2013	7:50:04	25.598	-99.54	4
164	17/11/2013	8:03:23	25.598	-99.52	3.6
165	17/11/2013	9:04:12	25.585	-99.584	2.9
166	17/11/2013	11:36:53	25.59	-99.566	3.5
167	17/11/2013	14:36:28	25.587	-99.566	3.2
168	18/11/2013	0:02:51	25.593	-99.554	3.9
169	18/11/2013	0:42:46	25.577	-99.611	2.9
170	18/11/2013	2:57:53	25.592	-99.366	3.2
171	18/11/2013	13:39:20	25.595	-99.527	2.8
172	19/11/2013	12:35:37	25.594	-99.589	3.1
173	20/11/2013	10:14:02	25.6	-99.588	3.9
174	21/11/2013	11:45:56	25.608	-99.503	3.6
175	23/11/2013	20:00:26	25.619	-99.503	2.8
176	25/11/2013	16:25:56	25.602	-99.625	4.4
177	26/11/2013	1:13:58	25.613	-99.493	4.7
178	27/11/2013	23:13:00	25.468	-99.597	2.8
179	29/11/2013	20:23:49	25.602	-99.505	4.8
180	29/11/2013	21:26:20	25.549	-99.773	3.3
181	02/12/2013	15:50:42	25.53	-99.749	2.7
182	02/12/2013	16:26:02	25.594	-99.412	2.8
183	03/12/2013	9:56:56	25.586	-99.576	3.1
184	03/12/2013	10:46:52	25.58	-99.573	2.9
185	03/12/2013	13:10:34	25.592	-99.438	2.9
186	04/12/2013	2:50:48	25.569	-99.665	3.2
187	04/12/2013	12:28:50	25.585	-99.607	3
188	04/12/2013	12:41:51	25.589	-99.518	3.2
189	04/12/2013	13:17:29	24.916	-99.451	2.2
190	04/12/2013	13:17:55	24.905	-99.462	2.6
191	05/12/2013	2:47:01	24.911	-99.452	2.6
192	05/12/2013	23:17:51	25.599	-99.375	3.3
193	07/12/2013	17:31:59	25.574	-99.612	2.9
194	09/12/2013	18:31:17	25.577	-99.454	2.7
195	11/12/2013	10:03:28	25.557	-99.494	3
196	11/12/2013	16:06:56	25.516	-99.816	3.2
197	11/12/2013	16:10:04	25.554	-99.677	2.9
198	15/12/2013	10:28:07	25.608	-99.618	3.9
199	19/12/2013	21:34:23	25.605	-99.516	4.1
200	20/12/2013	11:38:59	26.221	-99.729	2.9
201	20/12/2013	13:17:45	25.578	-99.598	2.8
202	22/12/2013	5:52:26	25.6	-99.543	2.9
203	05/01/2014	10:54:15	25.57	-99.596	3.1
204	05/01/2014	11:41:34	25.595	-99.527	3.8
205	06/01/2014	19:27:27	25.591	-99.535	3.5
206	06/01/2014	19:34:47	24.849	-100.205	2.8
207	07/01/2014	3:30:29	25.561	-99.664	2.9
208	07/01/2014	9:10:19	25.594	-99.526	3.5
209	08/01/2014	11:28:16	24.75	-98.441	3.1
210	08/01/2014	11:49:04	25.568	-99.639	3.2
211	14/01/2014	15:10:35	24.647	-98.445	3

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
212	14/01/2014	16:52:34	25.575	-99.599	2.8
213	21/01/2014	3:33:06	25.605	-99.539	3.6
214	22/01/2014	9:33:40	25.587	-99.63	3.2
215	30/01/2014	7:52:50	25.573	-99.613	3.1
216	02/02/2014	19:10:20	25.523	-99.824	3.5
217	05/02/2014	12:13:42	23.573	-97.696	3.1
218	05/02/2014	12:20:12	24.614	-98.46	3
219	10/02/2014	22:14:51	25.614	-99.504	4.4
220	13/02/2014	1:51:33	25.599	-99.581	2.8
221	13/02/2014	1:59:24	25.529	-99.733	2.6
222	17/02/2014	12:35:14	24.715	-98.443	2.9
223	19/02/2014	13:32:47	25.583	-99.611	2.8
224	20/02/2014	22:58:25	25.604	-99.57	3.1
225	25/02/2014	20:17:33	25.555	-99.654	3.1
226	26/02/2014	3:31:21	25.576	-99.681	2.8
227	01/03/2014	0:23:20	25.602	-99.544	3.3
228	01/03/2014	21:18:34	24.249	-99.175	3.6
229	02/03/2014	11:30:16	25.611	-99.539	5
230	02/03/2014	14:50:10	25.592	-99.594	3.3
231	02/03/2014	19:41:50	25.588	-99.569	3
232	02/03/2014	23:00:42	25.599	-99.573	3.1
233	03/03/2014	1:35:26	25.58	-99.338	3.3
234	03/03/2014	1:57:42	25.307	-99.376	3.7
235	03/03/2014	2:29:26	25.546	-99.757	3.7
236	03/03/2014	15:52:55	25.611	-99.404	3.4
237	04/03/2014	4:36:41	25.583	-99.323	4.2
238	04/03/2014	4:40:06	25.549	-99.235	3
239	04/03/2014	5:03:54	25.57	-99.751	4.8
240	04/03/2014	6:44:16	25.562	-99.695	3.3
241	05/03/2014	8:40:32	25.61	-99.507	4.9
242	07/03/2014	13:09:51	25.603	-99.547	3.6
243	09/03/2014	7:13:20	25.577	-99.617	3.6
244	10/03/2014	2:51:32	25.593	-99.462	3.6
245	10/03/2014	16:50:03	25.527	-99.81	2.6
246	11/03/2014	8:28:41	25.581	-99.505	4.1
247	11/03/2014	17:44:48	25.602	-99.451	3.7
248	13/03/2014	14:36:05	25.565	-99.444	2.8
249	14/03/2014	16:03:43	25.486	-99.621	3
250	17/03/2014	4:08:31	25.599	-99.561	3.3
251	17/03/2014	10:32:54	25.569	-99.323	4
252	17/03/2014	16:34:32	25.563	-99.422	3.2
253	17/03/2014	18:53:14	24.937	-98.688	3.3
254	18/03/2014	17:41:58	25.592	-99.549	4.9
255	18/03/2014	17:50:45	25.565	-99.517	3.3
256	28/03/2014	3:41:02	24.357	-99.946	3.2
257	31/03/2014	20:41:56	25.565	-99.536	3.2
258	02/04/2014	13:06:10	25.599	-99.537	4.4
259	02/04/2014	15:05:49	25.584	-99.596	3.8
260	04/04/2014	10:31:50	25.602	-99.481	3.3
261	07/04/2014	17:11:44	25.54	-99.763	3.1
262	07/04/2014	19:57:05	25.56	-99.625	3.4
263	11/04/2014	22:02:13	25.598	-99.49	3.4
264	13/04/2014	21:02:56	24.647	-99.223	2.5
265	25/04/2014	19:24:44	25.566	-99.488	3
266	28/04/2014	12:06:30	24.767	-99.456	3.3
267	04/05/2014	2:08:04	22.692	-100.448	2.9
268	04/05/2014	15:16:57	25.574	-99.444	3.5
269	08/05/2014	16:35:10	26.157	-99.816	2.9
270	12/05/2014	2:43:19	25.584	-99.537	2.8
271	15/05/2014	12:39:19	24.671	-98.443	2.9
272	19/05/2014	7:45:16	25.594	-99.553	3.5

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
273	19/05/2014	8:29:17	25.586	-99.559	3.1
274	19/05/2014	8:38:23	25.586	-99.545	2.9
275	21/05/2014	12:05:02	26.068	-99.844	4.3
276	28/05/2014	1:50:04	22.385	-99.135	2.6
277	03/06/2014	13:54:07	26.039	-99.825	3.2
278	03/06/2014	17:46:21	25.005	-99.809	2.9
279	04/06/2014	0:57:32	25.591	-99.591	2.9
280	09/06/2014	22:47:44	25.448	-98.303	2.8
281	09/06/2014	22:51:35	25.986	-99.667	2.7
282	15/06/2014	20:49:10	25.812	-100.061	3
283	28/06/2014	19:24:02	25.58	-99.542	2.8
284	04/07/2014	17:54:42	25.814	-100.797	2.4
285	13/07/2014	17:21:35	25.601	-99.458	3.3
286	14/07/2014	6:39:32	25.612	-99.575	3.6
287	19/07/2014	12:55:14	22.903	-97.796	3.4
288	22/07/2014	11:01:38	24.755	-98.575	3.1
289	31/07/2014	18:00:45	26.12	-100.339	2.5
290	08/08/2014	7:18:31	25.6	-99.502	2.3
291	08/08/2014	19:37:00	25.282	-101.073	3.1
292	08/08/2014	20:28:42	25.591	-99.6	2.9
293	09/08/2014	1:56:09	25.599	-99.462	2.9
294	11/08/2014	9:26:46	22.792	-99.877	2.9
295	18/08/2014	17:09:58	24.566	-99.194	3
296	24/08/2014	6:26:03	25.586	-99.328	3.5
297	24/08/2014	6:29:29	25.583	-99.632	3.3
298	27/08/2014	14:07:00	25.589	-99.495	2.7
299	31/08/2014	5:08:29	25.163	-99.788	3.2
300	02/09/2014	14:26:14	23.007	-99.032	3.2
301	09/09/2014	14:01:18	26.197	-99.79	2.6
302	09/09/2014	23:35:24	25.586	-99.579	3.1
303	09/09/2014	23:39:02	25.597	-99.494	3.4
304	22/09/2014	23:19:34	23.356	-99.281	2.8
305	14/11/2014	14:08:57	24.806	-98.449	2.9
306	14/11/2014	14:45:26	24.649	-98.746	3.1
307	03/12/2014	5:19:07	23.206	-99.451	2.5
308	22/12/2014	12:37:12	26.12	-99.849	2.6
309	23/12/2014	10:06:02	24.633	-101.661	4.2
310	30/12/2014	2:56:54	23.456	-100.204	2.4
311	30/12/2014	12:16:43	25.755	-100.66	2.7
312	04/01/2015	23:40:20	24.961	-99.515	1.7
313	04/01/2015	23:42:38	25.584	-99.511	2.6
314	05/01/2015	23:43:08	25.6	-99.536	3.1
315	15/01/2015	3:36:10	25.521	-99.444	2.5
316	18/01/2015	12:41:56	25.967	-100.771	1.8
317	18/01/2015	16:36:50	24.916	-100.223	2.9
318	19/01/2015	13:42:37	24.746	-99.04	2.9
319	20/01/2015	15:46:18	26.202	-100.484	1.8
320	21/01/2015	14:25:02	25.037	-99.579	3.4
321	23/01/2015	20:57:34	23.069	-99.175	2.5
322	26/01/2015	13:23:14	26.054	-100.135	2.1
323	27/01/2015	14:19:15	26.13	-99.161	2.9
324	27/01/2015	16:47:17	24.812	-101.176	2.1
325	28/01/2015	2:06:25	24.855	-99.452	1.2
326	29/01/2015	20:04:21	24.33	-100.051	2.1
327	30/01/2015	14:30:00	25.566	-99.626	3.3
328	30/01/2015	17:09:18	25.726	-100.769	2.9
329	30/01/2015	21:07:46	24.658	-99.883	2.1
330	02/02/2015	19:30:30	25.595	-99.617	2.4
331	03/02/2015	2:22:58	25.002	-99.557	2.1
332	03/02/2015	2:37:36	25.001	-99.561	2.2
333	05/02/2015	7:38:33	24.981	-99.475	2.1

Continúa en la siguiente página...

APÉNDICE B. COORDENADAS DE LA RELOCALIZACIÓN Y VALORES DE M_L PARA LOS SISMOS DE LA BAS

Tabla B.1 (Continuación...)

Evento	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	M_L
334	05/02/2015	17:01:37	25.308	-100.718	2
335	06/02/2015	13:56:15	23.824	-99.902	1.9
336	10/02/2015	12:17:58	27.907	-101.492	2.3
337	10/02/2015	15:04:19	27.897	-101.496	2.3
338	12/02/2015	12:03:30	27.872	-101.482	1.7
339	12/02/2015	14:24:04	24.59	-98.446	2.6
340	17/02/2015	12:20:06	27.896	-101.48	2.6
341	20/02/2015	1:10:31	24.802	-100.467	2.8
342	23/03/2015	13:09:52	24.597	-98.186	2.2
343	12/04/2015	6:07:32	24.414	-101.625	3.4
344	15/04/2015	16:28:11	24.887	-99.608	2.7
345	23/04/2015	19:37:53	25.417	-99.158	2.9
346	27/04/2015	3:07:22	22.015	-99.258	3
347	17/05/2015	22:07:07	28.537	-103.202	2.5
348	19/05/2015	14:03:57	26.229	-99.45	3.1
349	25/05/2015	15:19:57	27.85	-101.513	2.5
350	29/05/2015	16:18:36	23.995	-98.854	2.5
351	31/05/2015	23:34:17	25.275	-101.27	2.7
352	02/06/2015	18:45:13	27.791	-101.401	2.7
353	03/06/2015	14:44:15	23.409	-99.398	2
354	04/06/2015	16:26:43	24.314	-100.665	2.8
355	05/06/2015	7:26:28	27.817	-101.367	2.4
356	09/06/2015	17:49:01	27.934	-101.329	2.2
357	09/06/2015	22:13:02	25.84	-99.517	2.8
358	09/06/2015	22:29:13	25.716	-99.936	2.7
359	09/06/2015	23:06:59	24.677	-100.489	3
360	09/06/2015	23:07:02	25.838	-99.116	3
361	10/06/2015	4:17:21	24.125	-99.092	2.6
362	10/06/2015	13:01:33	24.49	-98.587	2.7
363	10/06/2015	15:51:53	25.626	-99.719	2.4
364	10/06/2015	15:53:45	25.018	-98.555	2.5
365	13/06/2015	2:19:36	25.877	-99.176	3.2
366	14/06/2015	18:17:48	27.886	-101.483	2.3
367	22/06/2015	18:03:51	25.285	-100.113	3.1
368	01/07/2015	18:25:46	24.608	-99.86	2.8
369	13/07/2015	23:18:16	22.564	-99.666	2.5
370	18/07/2015	11:12:18	27.147	-102.207	3
371	25/07/2015	3:02:42	25.371	-101.105	2.5
372	31/07/2015	17:45:31	25.913	-100.657	2.8
373	04/08/2015	4:43:14	24.06	-99.759	2.7
374	07/08/2015	14:10:18	24.091	-99.801	3.2
375	17/08/2015	15:05:34	27.881	-101.474	2.6
376	25/08/2015	20:36:20	22.965	-100.308	3.2
377	15/10/2015	19:49:17	23.248	-101.265	3
378	07/11/2015	18:22:13	25.461	-101.471	3.7
379	17/11/2015	21:11:12	25.826	-98.781	2.6
380	14/12/2015	16:18:29	25.341	-100.558	2.7
381	31/12/2015	12:23:55	24.706	-99.771	3.2

Apéndice C

Archivos de polos y ceros

Los siguientes son los siete archivos de polos y ceros de cada estación, los cuales se usaron en SAC para remover la respuesta instrumental de los registros en la base de datos.

MNIG	MCIG
CEROS 2	CEROS 5
POLOS 5	0.0 0.0
-3.70E-02 3.70E-02	0.0 0.0
-3.70E-02 -3.70E-02	-90.0 0.0
-1.13E+03 0.00E+00	-160.7 0.0
-1.01E+03 0.00E+00	-3108 0.0
-5.03E+02 0.00E+00	POLOS 7 -0.03852 +0.03658
CONSTANTE 5.40766E+17	-0.03852 -0.03658
	-178 0.0
	-135 +160
	-135 -160
	-671 +1154
	-671 -1154
	CONSTANTE 1.5514E+14

AAIG, RPIG y GTIG (horizontal)

AAIG, RPIG y GTIG (vertical)

CEROS 3

CEROS 3

0.0000000000 0.00000000

0.0000000000 0.00000000

0.0000000000 0.00000000

0.0000000000 0.00000000

-247.261 0.000000

-2.289730e+02 0.000000e+00

POLOS 6

POLOS 6

-0.135179 0.090905

0.108918 0.061628

-0.135179 -0.090905

0.108918 -0.061628

-89.0321 342.287

-1.164990e+02 2.368850e+02

-89.0321 -342.287

-1.164990e+02 -2.368850e+02

1088.39 806.23

-9.744390e+02 5.530390e+02

1088.39 -806.23

-9.744390e+02 -5.530390e+02

CONSTANT 5.827978E+17

CONSTANT 2.402560E+17

LNIG

CEROS 6

0.00E+00 0.00E+00

0.00E+00 0.00E+00

-4.63E+02 4.31E+02

-4.63E+02 -4.31E+02

-1.77E+02 0.00E+00

-1.52E+01 0.00E+00

POLOS 11

-1.33E+04 0.00E+00

-1.05E+04 1.01E+04

-1.05E+04 -1.01E+04

-5.20E+02 0.00E+00

-3.75E+02 0.00E+00

-9.73E+01 4.01E+02

-9.73E+01 -4.01E+02

-1.56E+01 0.00E+00

-3.70E-02 3.70E-02

-3.70E-02 -3.70E-02

-2.55E+02 0.00E+00

CONSTANTE 2.182127E+026

Apéndice D

Archivo de modelo de velocidades

El siguiente es el archivo de velocidades que se incluyó en SEISAN al relocalizar los sismos de la base de datos.

RESET TEST(07)=0.09

RESET TEST(08)=1.85

RESET TEST(09)=.0004

RESET TEST(40)=1.0

MNIG2536.56N10017.11W 681

LNIG2453.89N 9927.94W 295

GTIG2304.01N 9910.14W 378

RPIG2153.09N 9958.96W1024

AAIG2158.10N10222.81W1943

MCIG2752.63N10129.02W

6.0 0.0

7.76 16.0

7.95 33.0

8.26 100.0

8.58 200.0

8.97 413.0

20. 150.1000. 1.78

MEX

Bibliografía

- AKI, K. Y RICHARDS, P. (1980). Quantitative seismology: theory and methods. *Volume I: WH Freeman & Co .*
- ALSAKER, A., KVAMME, L., HANSEN, R., DAHLE, A. Y BUNGUM, H. (1991). The M_L scale in Norway. *Bulletin of the Seismological Society of America* **81**(2), 379–398.
- ANDERSON, J. Y WOOD, H. O. (1925). Description and theory of the torsion seismometer. *Bulletin of the Seismological Society of America* **15**(1), 1–72.
- ASKARI, R., GHODS, A. Y SOBOUTI, F. (2009). Calibration of an M_L scale in the Alborz region, Northern Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America* **99**(1), 268–276.
- ASTER, R., BORCHERS, B. Y THURBER, C. (2005). *Parameter estimation and inverse problems, Elsevier Academic Press.*
- BABA, A., PAPADIMITRIOU, E., PAPAACHOS, B., PAPAIOANNOU, C. A. Y KARAKOSTAS, B. (2000). Unified local magnitude scale for earthquakes of South Balkan area. *Pure and Applied Geophysics* **157**(5), 765–783.
- BAKUN, W., HOUCK, S. Y LEE, W. (1978). A direct comparison of “synthetic” and actual Wood-Anderson seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America* **68**(4), 1199–1202.
- BAKUN, W. Y LINDH, A. (1977). Local magnitudes, seismic moments, and coda durations for earthquakes near Oroville, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* **67**(3), 615–629.
- BAKUN, W. H. (1984). Magnitudes and moments of duration. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74**(6), 2335–2356.
- BAKUN, W. H. Y JOYNER, W. B. (1984). The M_L scale in central California. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74**(5), 1827–1843.

- BAUMBACH, M., BINDI, D., GROSSER, H., MILKEREIT, C., PAROLAI, S., WANG, R., KARAKISA, S., ZÜNBL, S. Y ZSCHAU, J. (2003). Calibration of an M_L scale in Northwestern Turkey from 1999 Izmit aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America* **93**(5), 2289–2295.
- BINDI, D., SPALLAROSSA, D., EVA, C. Y CATTANEO, M. (2005). Local and duration magnitudes in Northwestern Italy, and seismic moment versus magnitude relationships. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95**(2), 592–604.
- BOBBIO, A., VASSALLO, M. Y FESTA, G. (2009). A local magnitude scale for southern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* **99**(4), 2461–2470.
- BOCKHOLT, B. M., LANGSTON, C. A. Y WITHERS, M. (2015). Local magnitude and anomalous amplitude distance decay in the Eastern Tennessee Seismic Zone. *Seismological Research Letters* **83**(4), 1040–1050.
- BOORE, D. M. (1989). The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters. *Tectonophysics* **166**(1), 1–14.
- BORMANN, P. (2012). *New manual of seismological observatory practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; <http://nmsop.gfz-potsdam.de>; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2 urn:nbn:de:kobv:b103-NMSOP-2.
- BRAGATO, P. L. Y TENTO, A. (2005). Local magnitude in Northeastern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95**(2), 579–591.
- CHEN, T. Y CLAYTON, R. W. (2012). Structure of central and southern Mexico from velocity and attenuation tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **117**(B9).
- DEICHMANN, N. (2006). Local magnitude, a moment revisited. *Bulletin of the Seismological Society of America* **96**(4A), 1267–1277.
- DEL PEZZO, E. Y PETROSINO, S. (2001). A local-magnitude scale for Mt. Vesuvius from synthetic Wood-Anderson seismograms. *Journal of Seismology* **5**(2), 207–215.
- ESPINOSA, A. (1989). Determinación de la magnitud local M_L a partir de acelerogramas de movimientos fuertes del suelo. *Física de la Tierra 1*, Ed. Univ. Compl. Madrid, I **105**, 129.
- GALVÁN-RAMÍREZ, I. N. Y MONTALVO-ARRIETA, J. C. (2008). The historical seismicity and prediction of ground motion in Northeast Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* **25**(1), 37–48.

- GARCÍA-JIMÉNEZ, D. (2006). *Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central*. Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- GÓMEZ-ARREDONDO, C. M. (2014). *Relocalización y parámetros de fuente del enjambre sísmico generado durante agosto–diciembre 2012 en el centro del estado de Nuevo León, México*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- GÓMEZ-ARREDONDO, C. M., MONTALVO-ARRIETA, J. C. Y IGLESIAS-MENDOZA, A. (2016). Relocation and seismotectonic interpretation of the seismic swarm of August–December of 2012 in the Linares area, northeastern Mexico. *Geofísica Internacional* **55**(2), 95–106.
- GONZÁLEZ, M., VIDAL, A. Y MUNGUÍA, L. (2006). An M_L scale for the La Paz–Los Cabos region, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America* **96**(4A), 1296–1304.
- GREENHALGH, S. Y SINGH, R. (1986). A revised magnitude scale for South Australian earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* **76**(3), 757–769.
- GUTENBERG, B. Y RICHTER, C. (1942). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America* **32**(3), 163–191.
- GUTENBERG, B. Y RICHTER, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* **34**(4), 185–188.
- GUTENBERG, B. Y RICHTER, C. F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the seismological society of America* **46**(2), 105–145.
- HAFIEZ, H. A., EL-HUSSAIN, I., KHALIL, A. Y DEIF, A. (2014). Determination of a local earthquake magnitude scale for the Sultanate of Oman. *Arabian Journal of Geosciences* **8**(4), 1921–1930.
- HASSOUP, A. (2002). Seismicity and water level variations in the Lake Aswan area in Egypt 1982–1997. *Journal of Seismology* **6**(4), 459–467.
- HAVSKOV, J. Y OTTEMÖLLER, L. (1999). SeisAn earthquake analysis software. *Seismological Research Letters* **70**(5), 532–534.
- HAVSKOV, J. Y OTTEMÖLLER, L. (2010). *Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software*. Springer.
- HELFRICH, G., WOOKEY, J. Y BASTOW, I. (2013). *The Seismic Analysis Code: a primer and user's guide*. Cambridge University Press.

- HOUGH, S. E. (2000). On the scientific value of “unscientific” data. *Seismological Research Letters* **71**(5), 483–485.
- HUTTON, L. Y BOORE, D. M. (1987). The M_L scale in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America* **77**(6), 2074–2094.
- JENNINGS, P. C. Y KANAMORI, H. (1983). Effect of distance on local magnitudes found from strong-motion records. *Bulletin of the Seismological Society of America* **73**(1), 265–280.
- JOHNSTON, A. C. Y SCHWEIG, E. S. (1996). The enigma of the New Madrid earthquakes of 1811-1812. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **24**(1), 339–384.
- KANAMORI, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research* **82**(20), 2981–2987.
- KANAMORI, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics* **93**(3-4), 185–199.
- KANAMORI, H. Y JENNINGS, P. C. (1978). Determination of local magnitude, M_L , from strong-motion accelerograms. *Bulletin of the Seismological Society of America* **68**(2), 471–485.
- KANAMORI, H., MORI, J., HAUSSON, E., HEATON, T. H., HUTTON, L. K. Y JONES, L. M. (1993). Determination of earthquake energy release and M_L using TERRAScope. *Bulletin of the Seismological Society of America* **83**(2), 330–346.
- KANG, I., JUN, M. Y SHIN, J. (2000). Research on local magnitude (M_L) scale in and near the Korean Peninsula. *Annals of Geophysics* **43**(5).
- KANTER, L. R. (1994). *The Earthquakes of Stable Continental Regions: Assessment of Large Earthquake Potential*, chap. Tectonic interpretation of stable continental crust, en *The Earthquakes of Stable Continental Regions : Assessment of Large Earthquake Potential*. Palo Alto, CA: Electric Power Res. Inst., pp. 2–98.
- KATSUMATA, K. (2006). Imaging the high b-value anomalies within the subducting Pacific plate in the Hokkaido corner. *Earth, Planets and Space* **58**(11), e49–e52.
- KEIR, D., STUART, G., JACKSON, A. Y AYELE, A. (2006). Local earthquake magnitude scale and seismicity rate for the Ethiopian Rift. *Bulletin of the Seismological Society of America* **96**(6), 2221–2230.

- KIM, S. K. Y PARK, M. A. (2005). The local magnitude scale in the Korean Peninsula. *Pure and Applied Geophysics* **162**(5), 875–889.
- KIM, W. Y. (1998). The M_L scale in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America* **88**(4), 935–951.
- KIRATZI, A. Y PAPAACHOS, B. (1984). Magnitude scales for earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74**(3), 969–985.
- KOSSOBOKOV, V., KEILIS-BOROK, V., TURCOTTE, D. Y MALAMUD, B. (2000). Implications of a statistical physics approach for earthquake hazard assessment and forecasting. In: *Microscopic and Macroscopic Simulation: Towards Predictive Modelling of the Earthquake Process*. Springer, pp. 2323–2349.
- LANGSTON, C. A., BRAZIER, R., NYBLADE, A. A. Y OWENS, T. J. (1998). Local magnitude scale and seismicity rate for Tanzania, East Africa. *Bulletin of the Seismological Society of America* **88**(3), 712–721.
- LAY, T. Y WALLACE, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*, vol. 58. Academic Press.
- LI, B., HAVSKOV, J., OTTEMÖLLER, L. Y SØRENSEN, M. B. (2015). New magnitude scales M_L and spectrum-based M_w for the area around Shanxi Rift System, North China. *Journal of Seismology* **19**(1), 141–158.
- LOLLI, B., GASPERINI, P., MELE, F. M. Y VANNUCCI, G. (2015). Recalibration of the distance correction term for local magnitude (M_L) computations in Italy. *Seismological Research Letters* .
- LUCO, J. E. (1982). A note on near-source estimates of local magnitude. *Bulletin of the Seismological Society of America* **72**(3), 941–958.
- MÁRQUEZ-AZÚA, B. Y DEMETS, C. (2003). Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: implications for the neotectonics of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **108**(B9).
- MENKE, W. (1984). *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. Academic Press, Orlando.
- MIAO, Q. Y LANGSTON, C. A. (2007). Empirical distance attenuation and the local-magnitude scale for the central United States. *Bulletin of the Seismological Society of America* **97**(6), 2137–2151.
- MONTALVO-ARRIETA, J. C., RAMOS ZÚÑIGA, L. G., NAVARRO DE LEÓN, I. Y RAMÍREZ FERNÁNDEZ, J. A. (2011). Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de

- propagación de ondas de corte y evidencias geología. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* **63**(2), 217–233.
- MONTALVO-ARRIETA, J. C., SOSA-RAMÍREZ, R. L. Y PAZ-MARTÍNEZ, E. G. (2015). Relationship between MMI data and ground shaking in the state of Nuevo León, Northeastern Mexico. *Seismological Research Letters* **86**(5), 1489–1495.
- MUÇO, B. (1998). Twenty years seismic monitoring of induced seismicity in Northern Albania. *Pure and Applied Geophysics* **153**, 151–162.
- MUÇO, B. Y MINGA, P. (1991). Magnitude determination of near earthquakes for the Albanian network. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* **33**(129), 17–24.
- MUNGUÍA, L. Y BRUNE, J. N. (1984). Local magnitude and sediment amplification observations from earthquakes in the northern Baja California-southern California region. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74**(1), 107–119.
- NUTTLI, O. W. (1973). The Mississippi Valley earthquakes of 1811 and 1812: intensities, ground motion and magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America* **63**(1), 227–248.
- ORTEGA, R. Y QUINTANAR, L. (2005). A study of the local magnitude scale in the basin of Mexico: mutually consistent estimates of $\log A_0$ and ground-motion scaling. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95**(2), 605–613.
- OTTEMÖLLER, L. Y SARGEANT, S. (2013). A local magnitude scale M_L for the United Kingdom. *Bulletin of the Seismological Society of America* **103**(5), 2884–2893.
- OTTEMÖLLER, L., SHAPIRO, N. M., KRISHNA SINGH, S. Y PACHECO, J. F. (2002). Lateral variation of L_g wave propagation in southern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **107**(B1).
- PECHMANN, J. C., NAVA, S. J., TERRA, F. M. Y BERNIER, J. C. (2007). Local magnitude determinations for intermountain seismic belt earthquakes from broadband digital data. *Bulletin of the Seismological Society of America* **97**(2), 557–574.
- QUINTANILLA-LÓPEZ, Y. (2008). *Intensidades sísmicas esperadas para Monterrey, Nuevo León y su área metropolitana, a partir del posible rompimiento de la falla San Marcos y sismos recientes*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.

- RAMOS-ZÚÑIGA, L. G., MEDINA-FERRUSQUÍA, H. C. Y MONTALVO-ARRIETA, J. C. (2012). Patrones de sismicidad en la curvatura de Monterrey, noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **29**(3), 572–589.
- RASTOGI, B., MANDAL, P. Y KUMAR, N. (1997). Seismicity around Dhamni Dam, Maharashtra, India. *Pure and Applied Geophysics* **150**, 493–509.
- REZAPOUR, M. Y REZAEI, R. (2011). Empirical distance attenuation and the local magnitude scale for northwest Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America* **101**(6), 3020–3031.
- RICHTER, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America* **25**(1), 1–32.
- RICHTER, C. F. (1958). *Elementary seismology*. W. H. Freeman.
- SAUNDERS, I., OTTEMÖLLER, L., BRANDT, M. B. Y FOURIE, C. J. (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**, 1–15.
- SAVAGE, M. K. Y ANDERSON, J. G. (1995). A local-magnitude scale for the western Great Basin-eastern Sierra Nevada from synthetic Wood-Anderson seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America* **85**(4), 1236–1243.
- SCHOLZ, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* **58**(1), 399–415.
- SCHORLEMMER, D., WIEMER, S. Y WYSS, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature* **437**(7058), 539–542.
- SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL (). Magnitud de un sismo. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/otros/SSNRE-Magnitud.pdf>. Documento publicado en la sección de 'Reportes especiales'. Revisado el 16 de julio de 2015.
- SPALLAROSSA, D., BINDI, D., AUGLIERA, P. Y CATTANEO, M. (2002). An M_L scale in northwestern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**(6), 2205–2216.
- STANGE, S. (2006). M_L determination for local and regional events using a sparse network in Southwestern Germany. *Journal of seismology* **10**(2), 247–257.

- STEIN, S. Y WYSESSION, M. (2009). *An introduction to Seismology, earthquakes, and Earth structure*. John Wiley & Sons.
- SUTER, M. (1991). State of stress and active deformation in Mexico and western Central America. *Neotectonics of North America* **1**, 401–421.
- TOBYÁŠ, V. Y MITTAG, R. (1991). Local magnitude, surface wave magnitude and seismic energy. *Studia Geophysica et Geodaetica* **35**(4), 354–357.
- UHRHAMMER, R., HELLWEG, M., HUTTON, K., LOMBARD, P., WALTERS, A., HAUSSON, E. Y OPPENHEIMER, D. (2011). California Integrated Seismic Network (CISN) local magnitude determination in California and vicinity. *Bulletin of the Seismological Society of America* **101**(6), 2685–2693.
- UHRHAMMER, R. A. Y COLLINS, E. R. (1990). Synthesis of Wood-Anderson seismograms from broadband digital records. *Bulletin of the Seismological Society of America* **80**(3), 702–716.
- UHRHAMMER, R. A., LOPER, S. J. Y ROMANOWICZ, B. (1996). Determination of local magnitude using BDSN broadband records. *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**(5), 1314–1330.
- URBANCIC, T., TRIFU, C., LONG, J. Y YOUNG, R. (1992). Space-time correlations of b values with stress release. *Pure and Applied Geophysics* **139**(3), 449–462.
- VIDAL, A. Y MUNGUÍA, L. (1999). The M_L scale in northern Baja California, México. *Bulletin of the Seismological Society of America* **89**(3), 750–763.
- WAHLSTRÖM, R. Y STRAUCH, W. (1984). *A regional magnitude scale for Central Europe based on crustal wave attenuation*. Seismological Department.
- WIEMER, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters* **72**(3), 373–382.
- WIEMER, S. Y WYSS, M. (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.
- WYSS, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal International* **31**(4), 341–359.