

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CALIBRACIÓN MC-MW PARA SISMOS EN EL ORIENTE DE VENEZUELA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. García L., Gabriela J.
Para optar al Título
de Ingeniera Geofísico

Caracas, 2015.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CALIBRACIÓN MC-MW PARA SISMOS EN EL ORIENTE DE VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Cavada

TUTOR INDUSTRIAL: Dr. Herbert Rendón

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. García L., Gabriela J.
Para optar al Título
de Ingeniera Geofísico

Caracas, 2015.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Central de Venezuela por ser mi casa de estudio, porque a pesar de las adversidades que se puedan presentar nunca se da por vencida, incentivando al desarrollo de conocimientos en numerosas áreas pero también motivando cada día a ser mejores venezolanos, con un pensamiento libre, plural y heterogéneo.

A mi tutor académico el profesor José Cavada, que además de saber mucho sobre cualquier cosa es un valioso ser humano. No solo por asesorarme en el desarrollo de este trabajo especial de grado, sino a lo largo de toda la carrera, siempre con mucha paciencia y buen humor (sacando siempre una sonrisa con algún chiste muy malo, entendido por pocos).

A Herbert Rendón, mi tutor industrial de quien he aprendido innumerables cosas, y además es una gran persona. Gracias por toda la paciencia y toda la ayuda para salir de algún problema haciendo todo lo posible o si no dándome ánimos para que yo lo lograra. Quien con su labor y amplia experiencia reforzó mi interés por la sismología.

A mi familia, mis padres Helga y José, mis abuelos Berta y Fernando, mi hermano Fernando y mi sobrina Arantxa; todos ellos de alguna manera ayudaron llegar hasta aquí y culminar este difícil proceso. Gracias por estar siempre dándome su apoyo y especialmente su amor, para seguir adelante y no darme por vencida, a pesar de la distancia y lo difícil que pueda ponerse el camino.

A mis amigas, Fadhia, Marjohny, Ericka, y Andreina; quienes me acompañaron a lo largo de mi carrera, desde el segundo día del primer semestre en clase de descriptiva hasta hoy; espero contar con su amistad por muchos años más. Gracias por todo el apoyo, los buenos momentos, los viajes, las largas noches de estudio, los empujoncitos y regaños que muchas veces necesité y la paciencia.

García L., Gabriela J.

CALIBRACIÓN MC-MW PARA SISMOS EN EL ORIENTE DE VENEZUELA

Tutor Académico: Prof. José Cavada. Tutor Industrial: Dr. Herbert Rendón.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2015, 71 p.

Palabras clave: magnitud de Fiedler, magnitud de momento, factor Q.

Resumen: Con este trabajo especial de grado se buscó estimar una correlación entre la magnitud de Fiedler MC y la magnitud de momento Mw para sismos en el oriente de Venezuela ocurridos en los años 2010, 2013 y 2014. Con este objetivo se analizó una muestra total de 210 sismos con una Mw registrada mayor a 2.5 a los que se le calculó el valor de MC y reactualizó su valor Mw. Primero se obtuvieron valores de magnitud de Fiedler utilizando diferentes herramientas del software de análisis sísmológico SEISAN. En primer lugar, para obtener valores de magnitud de momento, Mw, fue necesario determinar valores de factor de calidad Q. Esto se logró utilizando el método de Coda Q, se calculó un factor Q para sismos someros y otro para sismos profundos, obteniéndose las siguientes ecuaciones de atenuación: para sismos someros $Q(f) = (70 \pm 2) f^{(0.81 \pm 0.01)}$ y para sismos profundos $Q(f) = (89 \pm 5) f^{(0.84 \pm 0.03)}$. Una vez que se contaba con una base de datos completa con valores de MC y Mw se realizó una gráfica que expusiera ambas variables a través de una distribución de puntos, para dicha distribución se generó una relación mediante una recta considerada como el mejor ajuste por medio de una regresión lineal de la que se obtuvo la siguiente función: $M_w = (0.68 \pm 0.14) * MC + (1.4 \pm 0.05)$. Este estudio se constituye en la primera investigación que propone una relación de conversión de MC a Mw, con este resultado podemos plantearnos próximamente homologar el catálogo sísmico nacional y así apuntar los estudios de la Amenaza Sísmica beneficiosos para el país.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I.....	10
Introducción	10
El problema	10
Justificación.....	11
Objetivo general	12
Objetivos específicos.....	12
Ubicación.....	12
Alcance	13
Antecedentes	14
CAPÍTULO II	18
Marco tectónico.....	18
CAPÍTULO III.....	25
Marco teórico	25
Atenuación.....	34
CODA Q.....	35
CAPÍTULO IV	37
Metodología	38
Cálculo de Magnitud de Fiedler (MC)	38
Factor de calidad Q.....	42
Cálculo de magnitud de momento (Mw).....	46

Calibración entre magnitudes	50
CAPÍTULO V.....	51
Resultados y análisis	51
Magnitud de Fiedler (MC)	52
Factor de calidad Q.....	53
Magnitud de momento (M_W).....	57
Relación empírica MC- M_W	58
CAPÍTULO VI.....	59
Conclusiones y recomendaciones	59
BIBLIOGRAFÍA.....	62
APÉNDICE.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO I.....	10
Introducción	10
Figura 1.Mapa de ubicación	13
Figura 2. Red Sismológica Nacional.....	14
CAPÍTULO II	18
Marco tectónico.....	18
Figura 3. Mapa de epicentros de sismos en la zona oriental de Venezuela,.....	18
Figura 4. Marco geodinámico del norte de Suramérica	20
Figura 5. Mapa de las principales fallas cuaternarias de Venezuela	21
Figura 7. Falla dextral El Pilar	22
Figura 8. Bosquejo de la falla El Pilar.....	24
CAPÍTULO III.....	25
Marco teórico	25
Figura 9. Principales zonas sismogénicas del mundo	26
Figura 10. Sismicidad en Venezuela	26
Figura 11. Relación entre magnitudes	30
Figura 12. Relación entre ML y Ms	31
Figura 13. Ilustración del efecto del instrumento.....	31
Figura 14. Ejemplo de registro para un evento sísmico	32
Figura 15. Ejemplo de onda coda	36
CAPÍTULO IV	37
Metodología	38

Figura 16. Listado de base de datos	38
Figura 17. Traza de sismo	39
Figura 18. Ejemplo de ventana MULTPLT en Seisan	40
Figura 19. Matriz de factor de distancia Q_v	40
Figura 20. Ejemplo de archivo Codaq.par.....	42
Figura 21. Ejemplo de archivo codaq.inp.....	44
Figura 22. Resultado ejemplo tras ejecución del programa CODAQ	45
Figura 23. Ejemplo de archivo MULPLT.DEF.....	46
Figura 24. Ventana MULPLT	47
Figura 25. Ventana MULPLT	48
Figura 26. Resultado de ejecución de análisis espectral.....	49
Figura 27. Ejemplo de correlación lineal entre MC y M_w	50
 CAPÍTULO V.....	 51
Resultados y análisis	51
Figura 28. Mapa con ubicación de epicentros	51
Figura 29. Histograma para valores obtenidos de magnitud de Fiedler (MC).	52
Figura 30. Mapa de cobertura de factor de calidad Q para sismos someros	54
Figura 31. Mapa de cobertura de factor de calidad Q para sismos profundos	56
Figura 32. Histograma para valores de magnitud de momento.....	57
Figura 33. Gráfico M_w vs MC para sismos en el oriente de Venezuela con ajuste lineal	58

ÍNDICE DE TABLAS

Página

CAPÍTULO V.....	51
Resultados y análisis	51
Tabla 1. Datos estadísticos para valores de magnitud de Fiedler	53
Tabla 2. Valores de factor Q obtenidos para sismos someros	53
Tabla 3. Valores de factor Q obtenidos para sismos profundos	55
Tabla 4. Datos estadísticos para valores de magnitud de momento.	58
APÉNDICE.....	65
Tabla 5. Sismos analizados.....	65

CAPÍTULO I

Introducción

El problema

La interacción entre las placas Caribe y Suramericana es la principal causa de sismicidad en Venezuela; esta interacción genera una franja de unos 100 km de ancho definida a lo largo de los sistemas montañosos de Los Andes, la cordillera Central y la cordillera Oriental; donde se ubican los principales sistemas de fallas sismogénicas del país: Boconó, San Sebastián y El Pilar, respectivamente, considerada esta franja como la zona con mayor actividad sísmica de Venezuela. Es por esto que los eventos sísmicos inciden como factor en uno de los mayores riesgos potenciales para el país en cuanto a pérdidas humanas y económicas.

La zona oriental, afectada por la actividad de la falla El Pilar, ha sufrido eventos sísmicos de relevante importancia, un ejemplo es el sismo de Cariaco de 1997 (magnitud 6.8 Ms). Por lo que el cálculo de la amenaza sísmica en este eje es esencial para generar acciones que minimicen los riesgos.

Uno de los parámetros más importantes que se consideran al momento de caracterizar un sismo es su magnitud, siendo ésta una medida directamente relacionada a la cantidad de energía liberada. Mundialmente existen distintas instituciones que se encargan de asentar información en cuanto a ubicación, fecha y magnitud de cada evento sísmico ocurrido. Este registro se muestra a través de un catálogo sismológico, el cual es emitido a nivel global por el ISC (International Seismological Center), a nivel regional CERESIS (Centro regional de sismología para América del Sur), y en Venezuela es generado por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

Existen múltiples escalas de magnitud utilizadas por centros sismológicos alrededor del mundo, lo que genera incongruencia al momento de compilar catálogos sísmicos. Actualmente la escala más confiable y útil es la magnitud de momento (M_w); hacer

uso de la misma con el fin de generar valoraciones de la magnitud que sean consistentes y válidas mundialmente, implica la conversión de las diferentes escalas locales empleadas en cada país a una misma escala para todos los catálogos, lo cual hasta la fecha no se ha logrado. Esto permitirá la disposición de catálogos homogéneos lo que representa una herramienta muy útil en cuanto a investigación sismológica se refiere.

En el país se han calculado las magnitudes haciendo uso de una escala local, denominada magnitud de Fiedler (MC), viéndose ésta reflejada en el actual catálogo.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación es obtener una relación que permita la conversión directa de magnitud (MC) a magnitud de momento (M_w), desarrollando una relación que permita la conversión directa de magnitud de Fiedler a magnitud de momento y así generar un catálogo instrumental para el período 2010-2014 con magnitud homologada M_w , permitiendo el cálculo adecuado de la amenaza sísmica, específicamente tomando datos del oriente del país, ajustando y actualizando la información, dándole mayor utilidad y practicidad.

Justificación

La investigación en la ingeniería debe tener como meta esencial el beneficio a la sociedad. La geofísica abarca muchas dimensiones que buscan este beneficio, pero específicamente dentro del campo de la sismología permite generar significativos aportes en el cálculo de amenaza sísmica y así buscar minimizar los daños que puedan ocurrir al presentarse algún movimiento telúrico importante. En este sentido, el presente trabajo investigativo se fundamenta en la búsqueda de una relación directa de conversión de magnitud de Fiedler (MC) a magnitud de momento (M_w).

Esto permitiría en un futuro generar un catálogo sísmico homologado para la zona oriental de Venezuela, implicando esto una contribución importante al momento de realizar estudios sismológicos, así como también el cálculo de amenaza sísmica para esta área del país, la cual ha sido históricamente afectada por sismos que han

sucedido recurrentemente, buscando así reducir las pérdidas humanas y económicas que pudiesen presentarse en el futuro.

Objetivo general

Estimar la relación entre la magnitud de Fiedler MC y magnitud de momento Mw para sismos ocurridos en el oriente del país.

Objetivos específicos

Calcular valores magnitud de Fiedler (MC) para sismos ocurridos en 2010, 2013 y 2014 en el área de estudio.

Obtener valores de factor de calidad Q para sismos someros y profundos en el oriente del país.

A partir del modelo Q encontrado generar base de datos con valores revisados de magnitud momento (Mw) para sismos ocurridos en 2010, 2013 y 2014 en la zona oriental de Venezuela.

Calibrar magnitud MC respecto de la magnitud momento (Mw) para sismos en la zona oriente.

Ubicación

La zona de estudio está definida por una ventana geográfica que comprende latitudes desde 7, 0° hasta 12,0° N y longitudes desde 61,0° hasta 67,0° O (figura 1).



Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio

Alcance

Para obtener una calibración entre magnitud de Fiedler y magnitud de momento (MC-Mw) se analizarán todos los sismos ocurridos dentro de la ventana geográfica dispuesta, durante los años 2010, 2013 y 2014. Se tomarán eventos con una magnitud de momento Mw mayor a 2.5. Este análisis se realizará utilizando registros sísmicos generados por las distintas estaciones pertenecientes a la red sismológica nacional ubicadas en el oriente venezolano, específicamente 15 estaciones (figura 2).

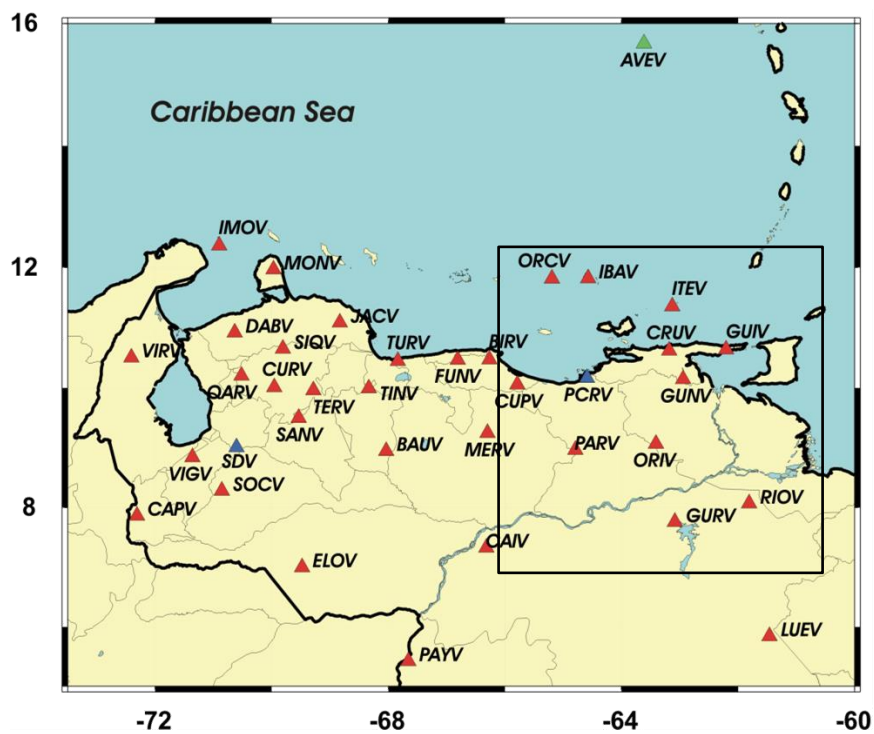


Figura 2. Red Sismológica Nacional con ventana geográfica dispuesta (modificado de FUNVISIS, 2015)

Antecedentes

En 1935 Charles Richter y Beno Gutenberg desarrollaron la escala de magnitud local (M_L), conocida mundialmente como magnitud de Richter, con el fin de cuantificar la cantidad de energía liberada en sismos intermedios (entre 3.0 y 7.0 M_L) en el sur de California en Estados Unidos. Esta escala se basó en el movimiento del suelo medido por un tipo de sismómetro específico llamado Wood-Anderson para un rango de distancias epicentrales locales.

Sin embargo, esta escala de medición presentaba problemas cuando se buscaba cuantificar sismos que estuviesen a distancias epicentrales mayores de 600 km. Por esto se realizaron cambios a esta escala lo que dio lugar a la escala modificada de Richter, la cual ha sido de gran utilidad para caracterizar sismos locales en todo el mundo.

Posteriormente, en 1979, y debido a problemas de saturación con los diferentes tipos de magnitud (m_b , M_S , etc.) usados como extensión del cómputo M_L más allá del ámbito local, Thomas Hanks y Hiroo Kanamori introdujeron la escala sismológica de magnitud de momento M_w . Esta es una escala logarítmica calibrada con la fórmula que sirve para estimar la energía total liberada durante un sismo, y está basada en el concepto del Momento Sísmico, el cual es susceptible de ser medido a partir del espectro de amplitud del movimiento sísmico registrado. La nueva escala así definida logra corregir los problema de saturación presente en los sismos de mayor magnitud.

Con el avance y desarrollo de nuevos instrumentos de medición, los investigadores han cambiado la escala con la que miden la magnitud de los sismos, utilizando actualmente la magnitud de momento.

A nivel mundial muchas instituciones sismológicas, así como también universidades, han logrado establecer relaciones empíricas entre magnitudes locales y magnitud de momento, con el fin de generar catálogos sísmicos homologados y demás contribuciones a la investigación sismológica.

Es necesario destacar que en Venezuela no se han realizado investigaciones con el fin de generar relaciones entre magnitud local y magnitud de momento, es por esto que la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas se ve en la necesidad de buscar dicha calibración.

Este trabajo especial de grado busca encontrar la relación entre M_C y M_w para el oriente del país, mientras que a la par se está llevando el mismo procedimiento hacia el occidente de Venezuela, desarrollado por el Br. Fernando Sorondo de la Universidad Simón Bolívar bajo la asesoría del Dr Herbert Rendón quién también está cumpliendo esa responsabilidad para esta investigación.

Entre los primeros trabajos realizados en todo el mundo, para tratar de encontrar una relación entre escalas de magnitud encontramos,

- Papazachos, B. et al. (1997). *Toward a Homogeneous Moment-Magnitude Determination for Earthquakes in Greece and the Surrounding Area*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 87, No. 2.

En esta investigación desarrollada por un grupo de científicos griegos, se buscó proponer una estrategia que ayudara a generar un catálogo sísmico estadísticamente homologado de eventos históricos y ocurridos en el siglo presente en el área de Grecia y sus alrededores (Albania, sur de Serbia, sur de Bulgaria y el oeste de Turquía), expresando todas las magnitudes de los sismos en M_w .

Para este estudio los registros de los sismógrafos de período intermedio ($T_0 \sim 4$ s) de Atenas, fueron los utilizados para calcular las magnitudes, los cuales se utilizaron en la era instrumental desde 1911. Con estos se desarrollaron relaciones empíricas respecto a la magnitud de momento.

Se demostró que la M_L para sismos en Grecia es media unidad menor que la magnitud de momento en el rango de magnitudes bajas ($4.5 < M_L < 6$). Así como también se propusieron relaciones para calcular magnitud de momento con respecto a otras magnitudes expresadas para eventos en el área de interés magnitud de momento, magnitud local, y magnitud de ondas corpóreas (M , M_L y m_b).

También se encontró una ecuación de correlación para magnitudes expresada de la siguiente manera: $M_L = 0.58M_s + 2.14$

Dado que en el presente trabajo de investigación, además de buscar una relación entre la magnitud de Fiedler M_C y la magnitud de momento M_w también tiene como objetivo encontrar un factor de calidad Q a través del método Coda Q para sismos en el oriente venezolano, es necesario destacar investigaciones anteriores desarrolladas para este procedimiento.

- Haskov J. et al. (1989). *Coda Q for the state of Washington*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 79, No. 4.

Este grupo de investigadores se enfocó en determinar un valor de factor Q para el estado de Washington en Estados Unidos aplicando el método de la onda coda. Para este estudio tomaron 95 sismos registrados digitalmente. Se agruparon los datos por regiones estructurales del estado, lo cual mostró pequeñas variaciones en cuanto a los valores obtenidos de Coda Q, excepto en una zona muy específica cercana al volcán *St. Helens*, donde el valor resultó ser significativamente menor que en el resto de las áreas. Un promedio de todas las áreas excepto por la zona del volcán mencionado, dio como resultado $Q = 63$ con un valor para el factor exponencial de frecuencia α de 0.97 en un rango de frecuencias de 2 hasta 16 Hz.

- García S. (2004). *Determinación del factor de calidad Q para Venezuela*. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar.

Para este trabajo se utilizó el método de Coda Q. Se seleccionaron sismos registrados por la red sismológica nacional entre enero 2002 y septiembre 2003, alcanzando un total de 341 sismos. Este fue el primer trabajo hecho en Venezuela sobre la atenuación de las ondas sísmicas haciendo uso de las ondas coda y el método Coda Q, para determinar el factor de calidad Q. Los valores de Q_0 y un factor de frecuencia α obtenidos en esta investigación permitieron escribir la ley de dependencia frecuencial promedio para Venezuela, de la forma:

$$Q(f) = 75 \cdot f^{(0.96)}$$

CAPÍTULO II

Marco tectónico

Una placa tectónica o placa litosférica es un fragmento de litosfera que se mueve como un bloque rígido sin que ocurra deformación en el manto superior de la Tierra. La tectónica de placas es una teoría que explica la estructura y la dinámica de la superficie terrestre. Establece que la litosfera está fragmentada en una serie de placas que se desplazan sobre la astenosfera. Esta teoría también describe el movimiento de las placas, sus direcciones e interacciones. En los bordes de placas se concentran actividades sísmicas, volcánicas y tectónicas.

Las zonas de placas contiguas a los límites son las regiones de mayores actividades tectónicas en el planeta. En ellas se concentran vulcanismo, orogénesis y sismicidad. Este último punto implica la ocurrencia de terremotos en los bordes, en fracturas, en regiones centrales y generalmente estables de las placas e intraplacas.

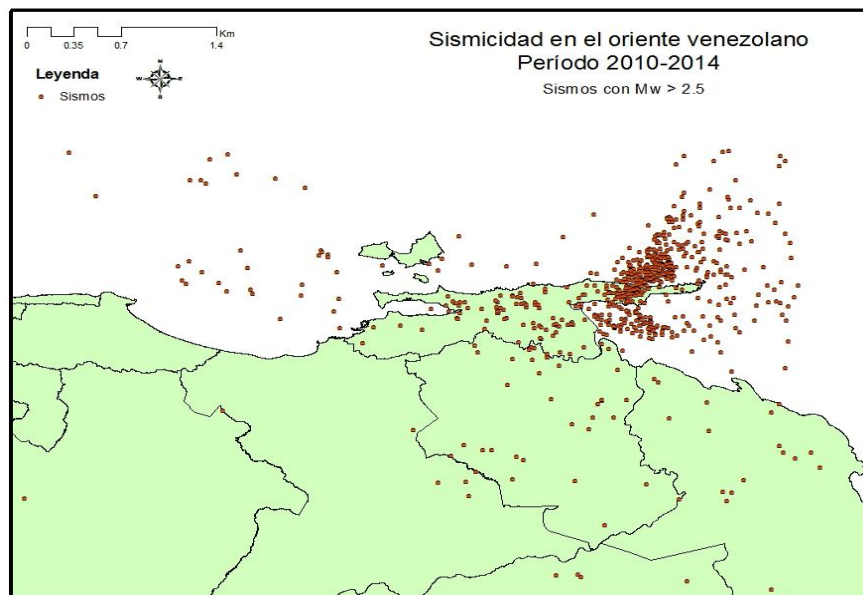


Figura 3. Mapa de epicentros de sismos en la zona oriental de Venezuela, entre 2010 y 2014.

En este sentido y en virtud del presente trabajo es necesario comprender el marco geodinámico del territorio nacional, específicamente de la zona norte, y más específicamente la zona oriental. Estando éste directamente relacionado con la actividad sísmica del país.

Audemard (2002), expone que la tectónica activa de Venezuela debe ser relacionada con la interacción entre las placas Caribe, Suramericana y Nazca e igualmente con otros bloques continentales entrampados entre las placas antes indicadas. Un amplio consenso establece que la placa Caribe se mueve aproximadamente hacia el este relativamente a Suramérica pero no es un límite de placa rumbo deslizante sencillo ya que es una zona de deformación transpresional (compresiva transcurrente) de más de 100 km de ancho.

Relieves importantes (las serranías de la Costa y el Interior, tanto en el centro como el oriente) están asociadas con este límite de placas septentrional de orientación este-oeste. Este cinturón de deformación compresivo-transcurrente se extiende hacia el suroeste a lo largo de los Andes de Mérida, donde ambos piedemontes y la cadena en si son acortados transversalmente en dirección NW-SE, mientras que la falla de Boconó acomoda movimiento transcurrente dextral. Este mismo mecanismo ocurre en Venezuela norcentral y nororiental, donde respectivamente el orógeno es acortado en dirección NW-SE, mientras las fallas de San Sebastián y el Pilar se desplazan dextralmente.

El régimen compresivo transcurrente a lo largo de la totalidad del sector norte del país, resultante de un vector de convergencia oblicuo entre las placas Caribe y sudamericana de orientación WNW-ESE, es responsable del mecanismo de partición de esfuerzos o deformaciones imperantes, de las transcurrencias acomodada por las fallas mayores (Oca-Ancón, San Sebastián y El Pilar) y sus riedels sintéticos.

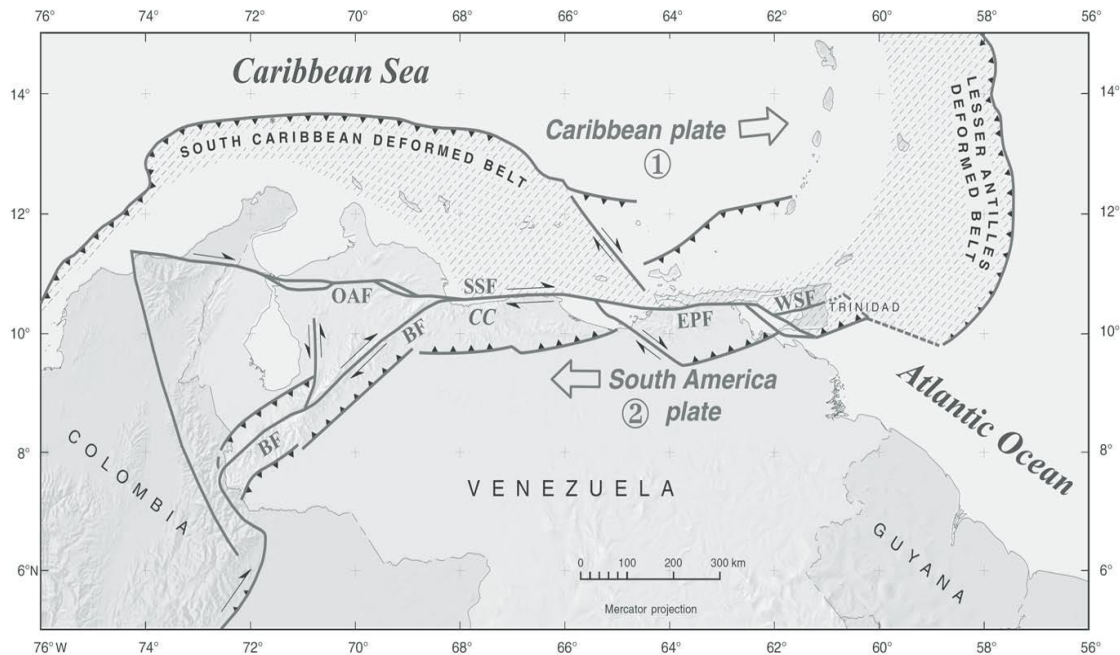


Figura 4. Marco geodinámico del norte de Suramérica (Audemard, 2011).

La zona de mayor movilidad, donde ocurren las principales deformaciones, la constituye el cinturón de unos 100 km de ancho, desarrollado en dos bloques separados por los accidentes dextrales de primer orden de Boconó (NE-SW), San Sebastián y El Pilar (E-W). Siendo éstas unas de las principales fallas sismogénicas del país.

Además de estos sistemas de fallas existen otros accidentes activos menores donde se puede mencionar Valera y Urica capaces de producir sismos importantes. El sistema de fallas de Boconó, El Pilar y San Sebastián, constituye límite entre la placa Caribe y Suramericana y es causante de los sismos más severos que han ocurrido en el territorio nacional. Las tres áreas de mayor riesgo sísmico son los Andes, la Sierra de Perijá, la región de Caracas y la Nororiental

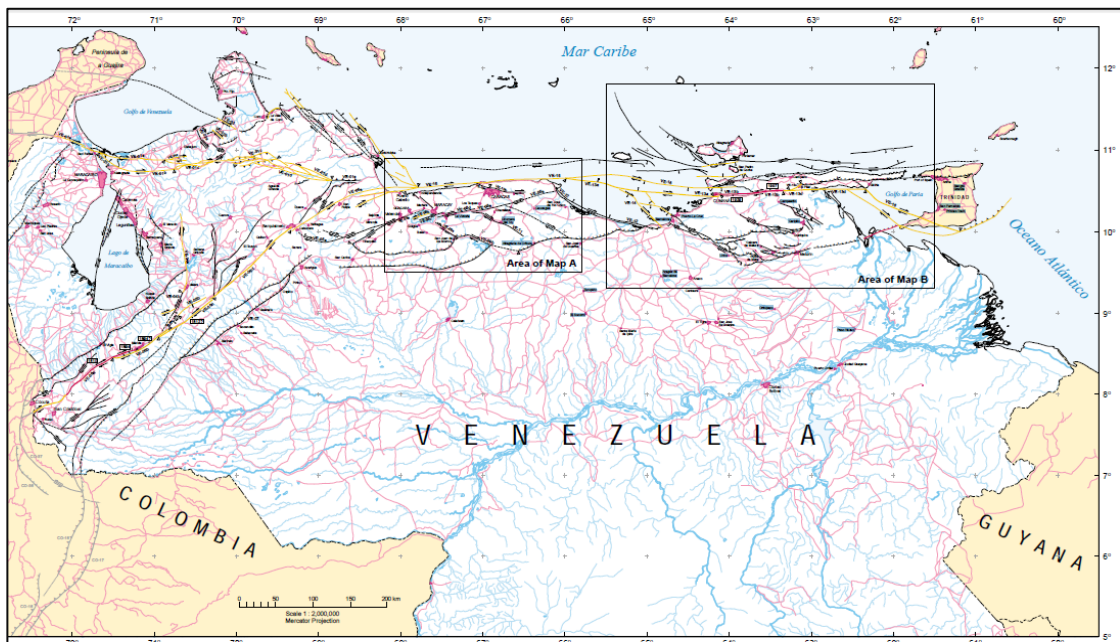


Figura 5. Mapa de las principales fallas cuaternarias de Venezuela (Audemard, 2000).

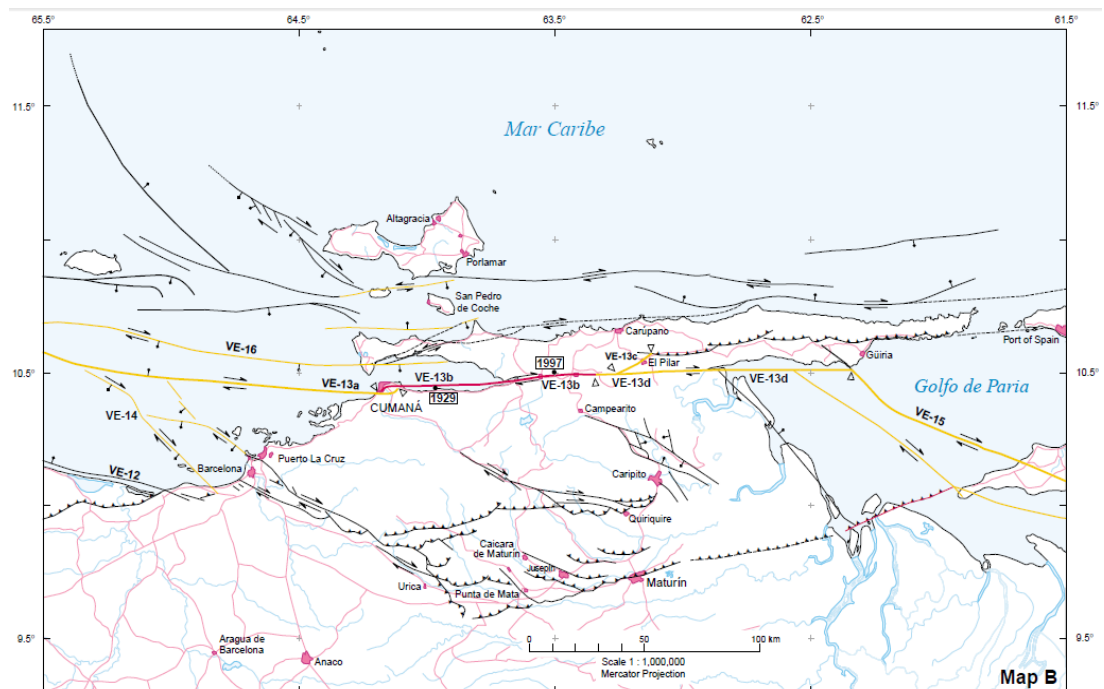


Figura 6. Mapa de las principales fallas cuaternarias de Venezuela, zona oriente (Audemard, 2000).

La falla El Pilar determina en buena medida la actividad sísmica de la zona oriental del país. Según (Audemard, 2011) esta falla se extiende hacia el este por aproximadamente 350 km desde la fosa de Cariaco – ubicada al sur de la isla La Tortuga - hasta el golfo de Paria, exhibiendo en la costa una porción de unos 80 km de largo en el estado Sucre entre los golfos de Paria y Cariaco. En esta región, la falla El Pilar separa dos provincias geológicas muy diferentes, la cordillera de La Costa que consiste en rocas meta sedimentarias e ígneas de edad cretácico temprano, al norte de la falla, mientras que al sur se tienen capas de rocas sedimentarias cretácicas con vergencia al sureste.

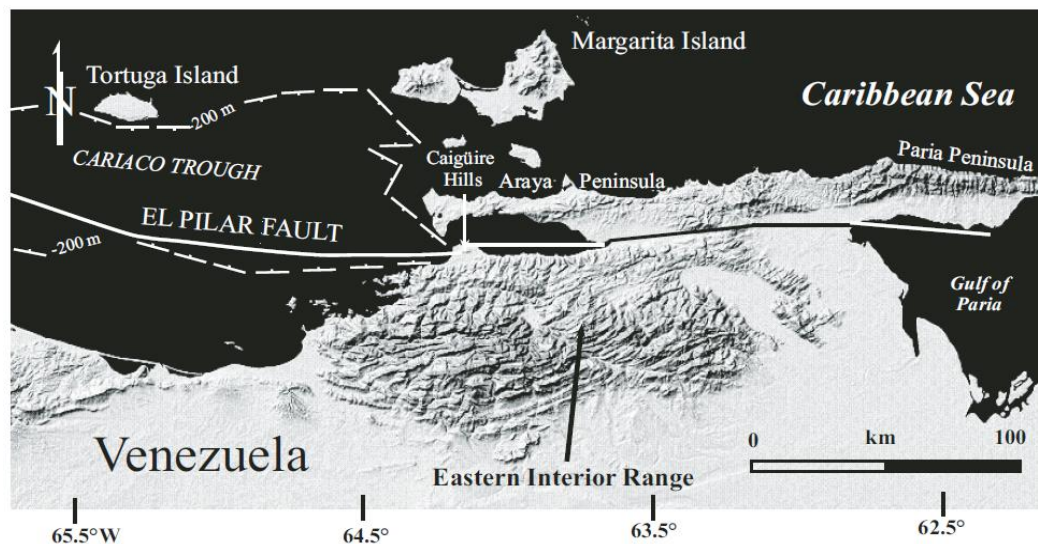


Figura 7. Falla dextral El Pilar mostrada en relación con las principales características fisiográficas y batimétricas del oriente venezolano. (Audemard, 2011).

La dirección de deslizamiento de esta falla es dextral, esto ha sido inequívocamente confirmado a través de estudios asociados a la superficie de ruptura del terremoto de Cariaco de 1997 siendo esto consistente con los mecanismos focales generados por el evento (Audemard, 2006). La traza activa de la falla de El Pilar se ha cartografiado en detalle basándose en la evidencia geomorfológica de la actividad tectónica por FUNVISIS y publicada por Beltrán (1994). De acuerdo con estos autores numerosos rasgos geomorfológicos a lo largo de la traza tales como: drenajes desplazados

lateralmente hacia la derecha, trincheras de fallas, crestas, flexión o hundimiento por fallas, ensilladura de fallas y escarpe de fallas, establecen el sentido dextral de la misma.

Basándose en cartografía no tectónica, la traza de la falla El Pilar fue subdividida en cuatro secciones diferentes: (1) Una traza submarina al este de Cumaná que está en contacto con la fosa de Cariaco (cuenca pull-apart) al sur y llega hasta las montañas de Caigüiré en Cumana ; (2) una sección que se extiende desde el lado norte del sobrepaso de la población de Rio Casanay ; (3) una sección de 30 km de largo que diverge ligeramente hacia el ENE y se extiende entre Rio Casanay y El Pilar ; (4) una sección con tendencia E-W que pasa a través de las zonas pantanosas de las sabanas de Venturini y va costa afuera hacia el sur de la península de Paria, antes de conectar con un stepover transtensional con la falla Warm Spring en Trinidad (Audemard, 2011).

Schubert, (1979) estableció que las extensiones submarinas de la falla El Pilar, hacia este y oeste, fueron determinadas a partir de métodos geofísicos. Estos estudios muestran de manera clara desplazamiento vertical tipo graben en la zona de falla. También se determinó un movimiento no rumbo deslizante, esto probablemente consecuencia de la orientación de los levantamientos geofísicos, siendo esta esencialmente perpendicular a la traza de la falla.

Se muestra por encima del nivel del mar solamente en dos regiones, entre Muelle de Cariaco y las regiones sur de Yaguaraparo (Estado Sucre, a lo largo de los istmos al sur de las penínsulas de Araya y Paria) y entre Puerto España y Matura (Trinidad). En la primera región está caracterizada por valles rectos drenados de ríos (Río Casanay y Río Chaguaranas) (figura 8).

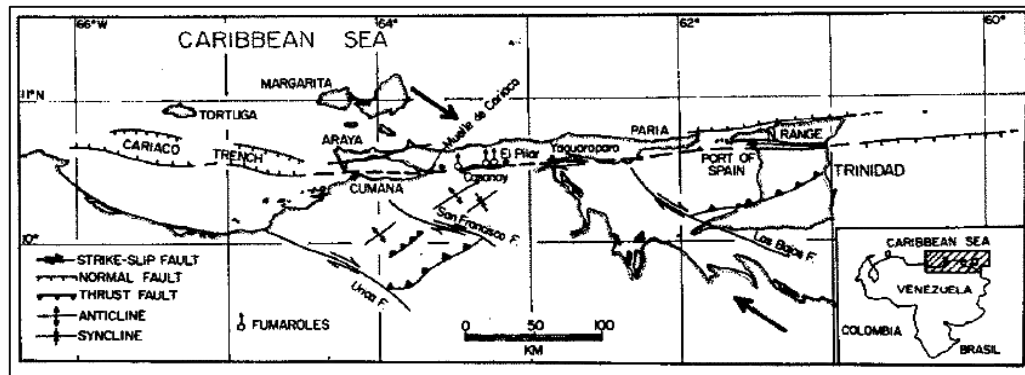


Figura 8. Bosquejo de la falla El Pilar (Schubert, 1979)

Se establece la presencia de cuñas de falla que contienen rocas metamórficas de edad Jurásico – Cretácico, rocas sedimentarias cretácicas y serpentinita. Además la traza de la falla está marcada por chorros hidrotermales y depósitos de sulfuros, la zona de falla consiste en múltiples zonas de fractura que bifurcan formando las cuñas.

CAPÍTULO III

Marco teórico

Los sismos son repentinas liberaciones de energía que ocurren en la corteza o manto superior de la Tierra, generadas en la mayoría de los casos por movimientos a lo largo de un plano de falla. Estas sacudidas que sobrevienen diariamente alrededor del mundo generan ondas que viajan radialmente, estas pueden ser muy débiles y solo ser detectadas con instrumentos modernos, o bien, pueden ser sentidas localmente sin mayores consecuencias, pero en ocasiones son capaces hasta de generar daños en estructuras.

Los sismos tectónicos ocurren si la parte rígida de la Tierra está sujeta a esfuerzos que exceden la resistencia interna de la roca, surgiendo generalmente en zonas de fallas preexistentes. La zona de ruptura puede tener hasta mil kilómetros de extensión con varios metros de desplazamiento, estos eventos ocurren en zonas sismogénicas, las cuales en la mayoría de los casos se encuentran a largo de límites de placas litosféricas.

Los sismos se pueden clasificar por su profundidad en: sismos superficiales (en la corteza superior), sismos intermedios (hasta 300 km de profundidad) y sismos profundos (hasta 700 km de profundidad). Los sismos tectónicos pueden ser causados por diferentes tipos de fallas: normales, inversas, transcurrentes, corrimientos, entre otras. Existen diversas zonas sismogénicas en el planeta, tal como se observa en la figura 9:

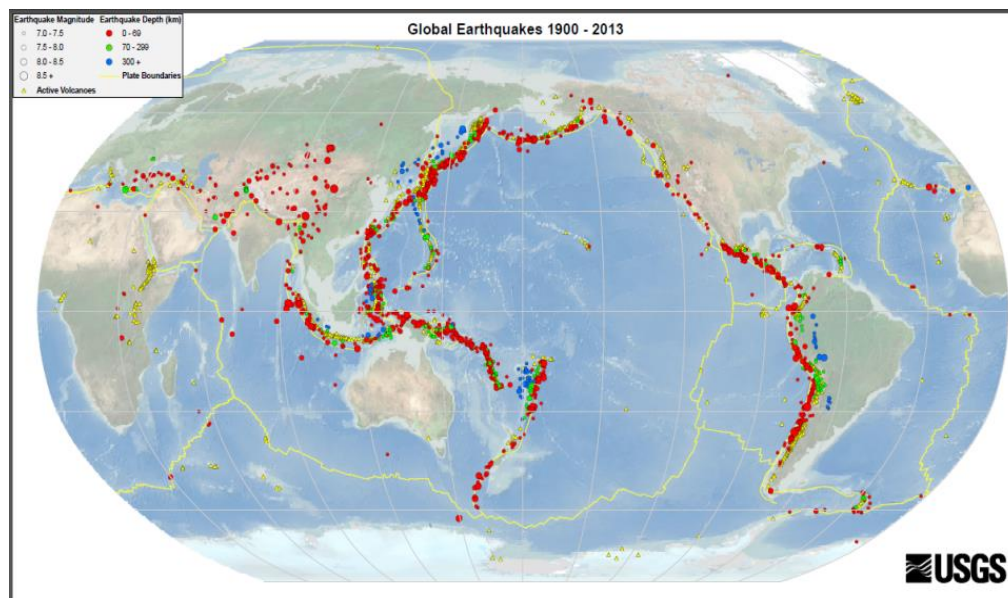


Figura 9. Principales zonas sismogénicas del mundo (USGS, 2015)

En Venezuela la actividad sísmica se desarrolla principalmente en la zona donde se encuentran los principales sistemas de fallas que comprende gran parte de la zona norte del país (falla de Boconó) hasta el oriente (falla El Pilar).

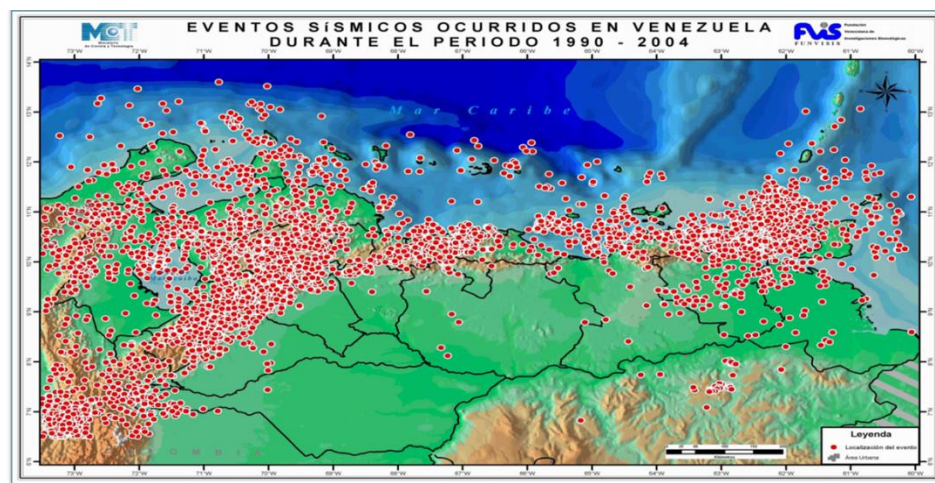


Figura 10. Sismicidad en Venezuela (FUNVISIS, 2015)

Existe una amplia gama de fuentes sísmicas que generan ondas sísmicas específicas y pueden ser divididas principalmente entre naturales y generados por el hombre.

Eventos naturales: sismos tectónicos, sismos volcánicos o tremores, transformaciones mineralógicas, colapsos de terrenos y microsismos (olas de mar) y eventos hechos por el hombre: fuentes controladas (explosiones-vibraciones) sismos inducidos por represas, sismo inducidos por actividad minera y ruido antrópico.

La sismología es la ciencia que estudia estas ondas, aportando la información que de ellas se extrae acerca de la estructura de la Tierra y la física de los terremotos. Esto representa el principal método para conocer el interior del planeta, donde es imposible la observación directa, permitiendo importantes avances en esta área. De igual forma, permite el progreso en la comprensión de los procesos físicos que generan los sismos, logrando los aportes en la búsqueda de maneras de minimizar los impactos de éstos para la humanidad.

La sismología constituye un campo relevante dentro de la geofísica y demás ciencias de la Tierra, su rango de aplicación va desde estudios del núcleo interno de la Tierra que se encuentra miles de kilómetros bajo la superficie, hasta estudios detallados de la estructura de la corteza superficial que permite entre otras cosas localizar yacimientos de hidrocarburos.

A finales del siglo XVII se comenzó a fundamentar esta ciencia, siendo al día de hoy innumerables sus aportes, entre los cuales cabe destacar el descubrimiento de los distintos tipos de ondas sísmicas, su forma de propagación, nacimiento de las teorías de refracción y reflexión sísmica, descubrimiento de discontinuidades entre las capas en el interior de la Tierra, teoría de deriva continental, determinación de la profundidad del núcleo y en 1935 es elaborada la primera escala de magnitud para establecer una medida la energía de un sismo por Richter.

La magnitud de Ritchter fue la primera escala de magnitud instrumental aplicada en los Estados Unidos. La escala estaba basada en la lectura de la amplitud (en mm) máxima de una traza de la onda registrada en un sismómetro Wood-Anderson (periodo de 0,8 segundos), referenciado a una distancia epicentral de 100 km . La escala de Ritchter permite estimar de una manera adecuada la cantidad de energía

sísmica liberada por un terremoto hasta un valor máximo de M_L 6,5, pero por encima de este valor esta escala progresivamente desestima la verdadera energía liberada (McCalpin, 2009).

Distintas escalas son mundialmente usadas y cada una se basa en la medición de un tipo específico de ondas sísmicas, en un rango de frecuencia determinado. Las escalas comúnmente usadas en los países occidentales, en orden cronológico de aparición, son local o Richter (M_L), magnitud de ondas superficiales (M_S), magnitud de ondas corpóreas (m_b) y magnitud de momento (M_w)

En este sentido, según Shearer (2009), la medida más conocida para determinar el tamaño de un sismo es su magnitud, siendo uno de los parámetros más fáciles de obtener. Existen distintos tipos de escalas de magnitud, pero todas están relacionadas a la máxima amplitud registrada en un sismograma. De acuerdo con Haskov y Ottemöller (2010), las magnitudes de los sismos son calculadas con el fin de:

- Expresar la cantidad de energía liberada para estimar los daños después de la ocurrencia de un evento sísmico.
- Expresar el tamaño físico de un sismo.
- Predecir movimiento del suelo y la amenaza sísmica.

El cálculo de la magnitud es una tarea básica y esencial para cualquier centro sismológico global o local. Diferentes escalas están adecuadas para distintas distancias y magnitudes. La definición más general de magnitud M es:

$$M = \log(A/T)_{max} + Q(\Delta, h) \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

Dónde A es la amplitud del desplazamiento del suelo en conjunto con su período relacionado T , mientras que Q es la función de corrección para la distancia epicentral Δ y la profundidad del sismo h .

Para Venezuela, Fiedler en 1978 introdujo el uso de una escala local para el cálculo de magnitud sísmica (MC) definida para sismos cercanos con distancias epicentrales hasta 1000 km y profundidades hasta 200 km, tomando en cuenta solo la llegada de ondas P en componente vertical. Teniendo así la siguiente expresión

$$MC = 0.82 (Q_v + \log_{10}(V_z)) \quad \text{(Ec. 2)}$$

Dónde

Q_v = Factor de distancia que depende de la distancia epicentral y profundidad.

V_z = Velocidad vertical de las partículas del suelo.

La magnitud de momento (M_w) desarrollada está definida, de acuerdo a la forma estándar recomendada por el IASPEI, como:

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 6.07 \quad \text{(Ec.3)}$$

Dónde M_0 es el momento sísmico medido en Newton metro, siendo este una cuantificación directa del tamaño del sismo (producto del área de ruptura y del desplazamiento final estático, promediando en dicha área) (Haskov y Ottemöller, 2010).

Desde el surgimiento de la escala M_w , muchos estudios se han llevado a cabo en diferentes regiones y ambientes sismo-tectónicos para establecer relaciones conectando otras escalas de magnitud a ésta. Siendo la razón más importante para esto el compilar los catálogos sismológicos que estuvieran expresados en otras escalas comunes, y llevarlos a catálogos homologados, para resolver problemas prácticos (amenaza sísmica) así como también problemas teóricos (cálculo de deformación cortical), esto según lo expresado por Scordilis (2006).

Con las diferentes escalas de magnitud, sus rangos de validez y sus instrumentos usados, es natural preguntarse qué tan diferentes son.

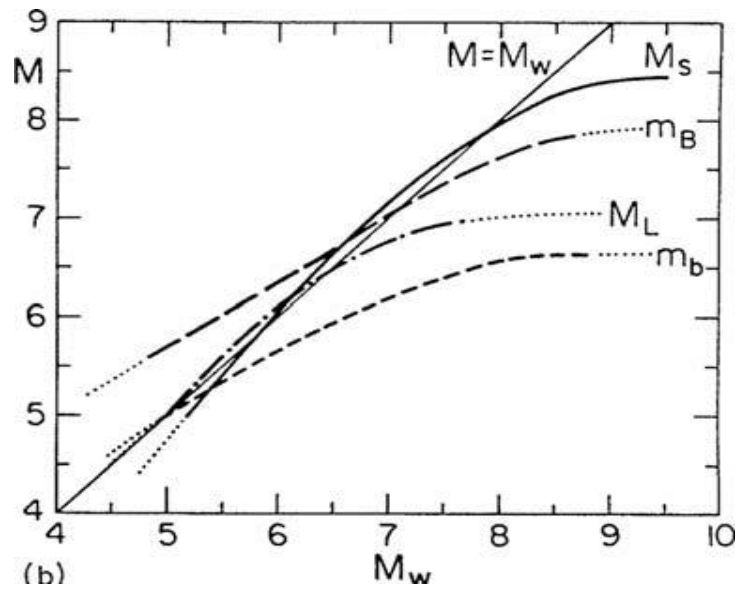


Figura 11. Relación entre magnitudes (Haskov y Ottemöller, 2010)

Se puede observar que desde la magnitud 4 hasta la 6,5 hay similitud razonable entre M_L , M_s y M_w , pero no entre m_b y m_B .

La conversión de magnitudes locales a magnitud de momento se logra a través de relaciones empíricas. Lo que implica la observación, experiencia y práctica, puesto que no existe un patrón definido para estos cálculos.

Para lograr esta relación entre escalas es posible utilizar distintos métodos espectrales, tales como: ajuste simultáneo, apilamiento espectral, análisis de pulso de desplazamiento unipolar (Allmann et al., 2011)

Uno de los métodos usados comúnmente es el ajuste lineal (Scordilis, 2006). Se obtiene una relación entre 2 variables mediante regresión lineal; en estadística la regresión lineal o ajuste lineal es un método matemático que modela la relación entre una variable dependiente Y , las variables independientes X y un término aleatorio.

Se obtiene una ecuación donde se expresa la dependencia de una de las variables, en el caso de magnitudes sería alguna magnitud con respecto a la otra. Tal como ejemplifica la investigación de Papazachos et al. (1997).

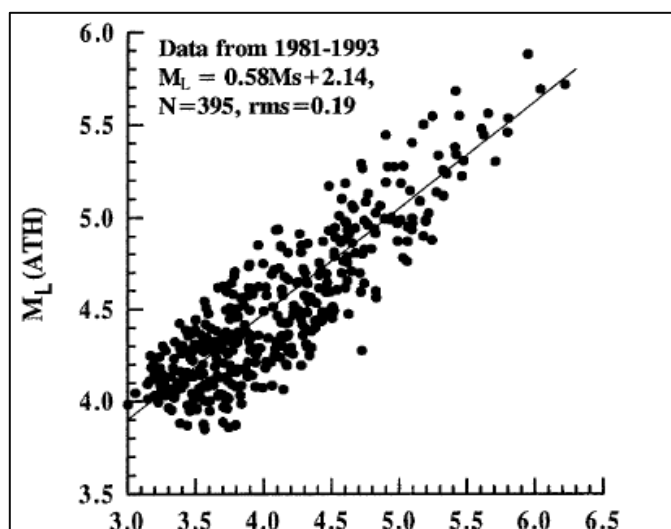


Figura 12. Relación entre ML y Ms con ajuste lineal y ecuación (Papazachos et al., 1997).

Actualmente la información de los sismos se encuentra en formato digital lo que le da al analista muchas opciones para observar los datos en diferentes maneras y llevar a cabo tareas avanzadas en el procesamiento de las señales sísmicas. Estas señales se representan a través de un sismograma obtenido como la convolución de la señal de entrada con la respuesta al impulso del instrumento.

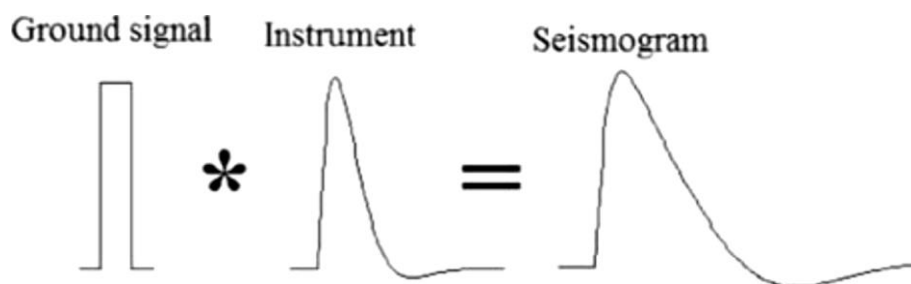


Figura 13. Ilustración del efecto del instrumento de registro sobre la señal sísmica. (Haskov y Ottemöller, 2010)

Los sismogramas permiten identificar las distintas fases sísmicas, como por ejemplo la llegada de onda P y la llegada de onda S.

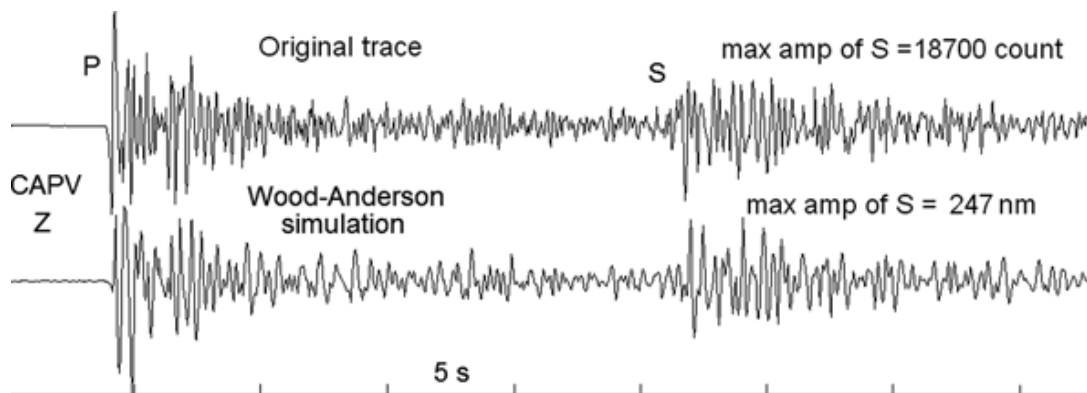


Figura 14. Ejemplo de registro para un evento sísmico, con fases P y S señaladas (Haskov y Ottemöller, 2010).

Cuando se busca determinar fases en sismos en eventos pequeños registrados con instrumentos de banda ancha, comúnmente es necesario filtrar las señales. El filtrado es la operación de procesamiento de señal más común, esto se hace para realzar ciertas características así como omitir otras. Un filtro tiene la finalidad de remover parte de la señal en un rango de frecuencia particular, y en este sentido existen tres tipos de filtro que son los más usados:

Filtros pasa alto en frecuencia f_1 : remueve los componentes de las señales por debajo de la frecuencia f_1 .

Filtros pasa bajo en frecuencia f_2 : remueve los componentes de la señal que están por encima de la frecuencia f_2 .

Filtro pasa banda desde frecuencia f_1 hasta frecuencia f_2 : remueve los componentes de la señal por encima de f_2 y por debajo de f_1 . (Haskov y Ottemöller, 2010)

Un catálogo sísmico es una lista de sismos con sus propiedades: tiempo de origen, hipocentro, magnitud y epicentro. Estos compendios son emitidos por las distintas instituciones sismológicas, locales, regionales y globales. Siendo una de sus principales aplicaciones el adecuado cálculo de la amenaza sísmica, entendiendo ésta como la probabilidad de excedencia de un determinado umbral para la intensidad del movimiento, en un lugar geográfico específico y ventana de tiempo determinada,

como consecuencia de la ocurrencia probabilística de los sismos (Pailoplee et al., 2009), de igual forma, la amenaza sísmica es la probabilidad de que la amplitud del movimiento del suelo exceda un cierto límite en un lugar específico (Suckale et al., 2005).

Existen dos enfoques que son tradicionalmente usados en la estimación de la amenaza sísmica: el método determinístico y el método probabilístico. El método determinístico busca calcular la máxima intensidad de movimiento del suelo en un sitio específico a través del concurso de un terremoto-escenario que suceda en la proximidad del sitio. Por otra parte, el método probabilístico se basa en que conocida la sismicidad pasada, se pueden establecer las leyes estadísticas que rigen la ocurrencia de eventos sísmicos en la región de estudio, y las correspondientes intensidades al movimiento que se pueda generar, al considerar este fenómeno como un proceso estocástico.

La hipótesis de partida es que la información sísmica manejada es suficiente como para deducir las leyes estadísticas a que se ajusta el fenómeno analizado. Se supone que la sismicidad es estacionaria, pero estos métodos no tienen una dependencia tan fuerte del conocimiento del valor máximo del parámetro con que se evalúa la amenaza sísmica, ya que esta evaluación se fundamenta en los terremotos de todos los niveles de magnitud. Al usar este enfoque se obtiene la probabilidad de ocurrencia de distintos niveles de intensidad del movimiento del terreno en un lugar determinado, en un período de tiempo dado (Reiter, 1990).

Esta es la principal ventaja frente a los métodos deterministas: en este caso no se obtienen los valores máximos del parámetro que define la intensidad del movimiento del terreno, sino la distribución de probabilidades para los distintos niveles de intensidad o daño. Esto es algo fundamental para el diseño estructural, al poderse seleccionar el nivel de riesgo más adecuado a cada estructura en particular, sin tener que penalizar económicamente el diseño al considerar el efecto máximo como en el caso anterior. Otra consideración importante es que la sismicidad se distribuye de

manera uniforme dentro de cada fuente por lo que no es tan crítica la exactitud en la localización. Además, el terremoto máximo posible en una zona no está determinado por el terremoto más fuerte registrado en el pasado, sino que éste se estima a partir de las leyes estadísticas de la sismicidad de la zona.

Para el estudio de la Amenaza Sísmica en Venezuela, la nueva y moderna Red Sismológica Nacional ha brindado un valioso aporte en la ubicación y caracterización de la actividad sísmica del país desde su instalación en el año 2000. Una consecuencia importante del registro continuo de la sismicidad en todo el territorio nacional (y en algunos casos de la actividad desarrollada en países vecinos como Colombia y Trinidad) ha sido la conformación y constante actualización de un catálogo sismológico de gran precisión y completitud, debido a una mejora en la localización de los sismos.

La conformación de un catálogo sismológico completo ha permitido a su vez investigaciones importantes en el área de la sismología, la geología y la ingeniería sísmica. La evaluación de la actividad sismológica reciente e histórica y la caracterización y ubicación de las fallas geológicas activas han permitido la estimación de las zonas de mayor o menor amenaza en Venezuela, a través de la elaboración de mapas de Zonificación Sísmica (Vásquez, s.f.).

Atenuación

Para Haskov y Ottemöller (2010) la atenuación de la amplitud causada por la atenuación inelástica y la dispersión puede ser descrita a través del factor Q como:

$$A(f, t) = A_0 e^{\frac{-\pi f t}{Q(f)}} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Donde A es la amplitud inicial, $A(f, t)$ la amplitud después que las ondas han viajado un tiempo t , f la frecuencia y $Q(f)$ representa el factor de calidad, inversamente proporcional a la atenuación, para material litosférico, éste tiene una dependencia con la frecuencia según la siguiente expresión

$$Q(f) = Q_0 f^a \quad \text{(Ec.5)}$$

Una región sismogénica puede estar caracterizada por actividad tectónica, volcánica, sísmica además de formaciones geológicas e historia geológica. Todas estas propiedades determinan el comportamiento de la propagación de la energía sísmica en la litosfera de modo tal que la caracterización del modo de propagación de las ondas sísmicas, siempre pueden arrojar luces sobre las propiedades ya referidas.

A medida que la energía sísmica se propaga a través de la Tierra su energía (amplitud) decae debido a la dispersión geométrica, la atenuación intrínseca y la atenuación por dispersión. La atenuación intrínseca convierte la energía sísmica en calor debido a la absorción inelástica y la atenuación por dispersión redistribuye la energía en las distintas heterogeneidades presentes en el medio terrestre. Por consiguiente la atenuación de ondas sísmicas en la litosfera es una propiedad muy importante para el estudio de la estructura de la tierra y actividad sismotectónica, Kumar et al (2005).

Jin y Aki (1989) establecen que el factor de calidad de coda Q (inverso del factor de atenuación sísmica) en la frecuencia de 1 Hz puede ser útil al momento de cuantificar la sismicidad en regiones, pero como el factor de atenuación varía dependiendo de la zona se hace necesario realizar cálculos específicos del valor de Q . Existen distintos métodos para la obtención de este valor: es posible determinarlo a partir de análisis espectral, método de dos estaciones, método de múltiples estaciones y el método de coda Q . Este último se basa en el análisis de la onda coda presente en un registro sismológico.

CODA Q

El tren de ondas CODA está definido por la superposición de ondas secundarias a través de retrodispersión de ondas corpóreas primarias. El decaimiento de la onda CODA a lo largo del tiempo a una frecuencia dada es debido únicamente a la atenuación de energía y esparcimiento geométrico pero independiente de la fuente y vía de propagación de un sismo. Generalmente el factor Q aumenta con la frecuencia (Mitchell, 1981) a través de la relación:

$$Q = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^n \quad (\text{Ec.6})$$

Donde Q_0 es el factor de calidad a la frecuencia de referencia f_0 (generalmente 1 Hz) y n es el parámetro de frecuencia, el cual es cercano a 1 y varía de región a región dependiendo de la heterogeneidad del medio (Aki, 1981).

Según Haskov y Ottemöller (2010) las ondas CODA constituyen el final de las señales sísmicas para eventos locales y regionales. La determinación de Q a partir de las ondas CODA es uno de los métodos más populares para determinar Q ya que solo requiere una estación y no necesita información sobre calibraciones.

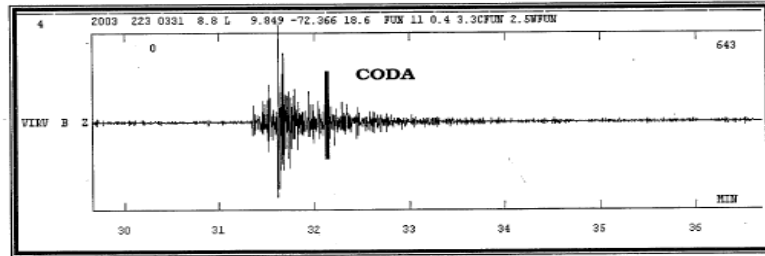


Figura 15. Ejemplo de onda coda

Aki y Chouet en 1975, encontraron que el decaimiento de amplitud de las ondas CODA puede ser expresado como:

$$A(f,t) = t^{-\beta} A_0 e^{-\pi f \kappa} e^{-\pi f t / Q(f)} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde β es 1 para ondas corpóreas y 0,5 para ondas superficiales.

Haskov et al en 1989 exponen que la ecuación anterior solo es válida a partir de un tiempo t , el cual es dos veces mayor que el tiempo de viaje de las ondas S. La misma puede ser expresada como:

$$\ln(A(f,t)) + \beta \ln t = \ln(A_0) - \pi f \kappa - \pi f t / Q(f) \quad (\text{Ec.8})$$

Dónde Q puede ser obtenida a partir de la regresión lineal de $\ln(A(f,t)) + \beta \ln(t)$ para un t a una frecuencia constante. $A(f,t)$ es usualmente obtenido a partir de filtrado de la señal con filtros pasa banda, con una frecuencia cercana a f y con un decaimiento en el tiempo que envuelva toda la señal filtrada. Otra manera de calcular $A(f,t)$ es con una ventana móvil de una transformada rápida de Fourier (FFT).

Cuando se dispone de suficientes curvas de decaimiento para un mismo sitio, todos los datos se invierten simultáneamente para obtener Q. Sin embargo, también es posible obtener el mismo resultado al calcular un valor de Q para cada curva y luego promediando los valores de Q^{-1} (promedio armónico).

Una observación que se repite en todos los estudios de Coda Q, es el hecho de que los valores de Q aumentan al acrecentar la ventana de tiempo, es decir que al aumentar el valor del tiempo de inicio para Coda y ampliar el tamaño de la ventana para la misma, incrementa el valor de Q, interpretándose esto como un aumento de Q con la profundidad. Si se busca determinar Q para diferentes áreas, es recomendable usar ventanas de tiempo con duración constante y que comiencen al mismo instante, para comparar resultados y así estar seguros de que las diferencias observadas no se deben al muestreo a distintas profundidades.

CAPÍTULO IV

Metodología

Cálculo de Magnitud de Fiedler (MC)

1. Obtención de velocidad vertical de partículas del suelo (v_z) para cada evento sísmico

- 1.1. Selección de llegada de fase P: se escoge un sismo de la base de datos en la ventana de trabajo del software Seisan v8.2.1, posteriormente se hace clic sobre la opción Plot (figura 16), observando así las distintas formas de onda para cada estación que haya registrado el evento. En la ventana MULTPLT single trace mode se selecciona una estación ubicada dentro de la ventana geográfica establecida, con forma de onda en componente vertical (Z) (figura 17). Se posiciona el ratón sobre el momento de llegada de la fase P considerado y presionando el número 2, que corresponde a la fase P, se deja establecida la llegada de la fase P.

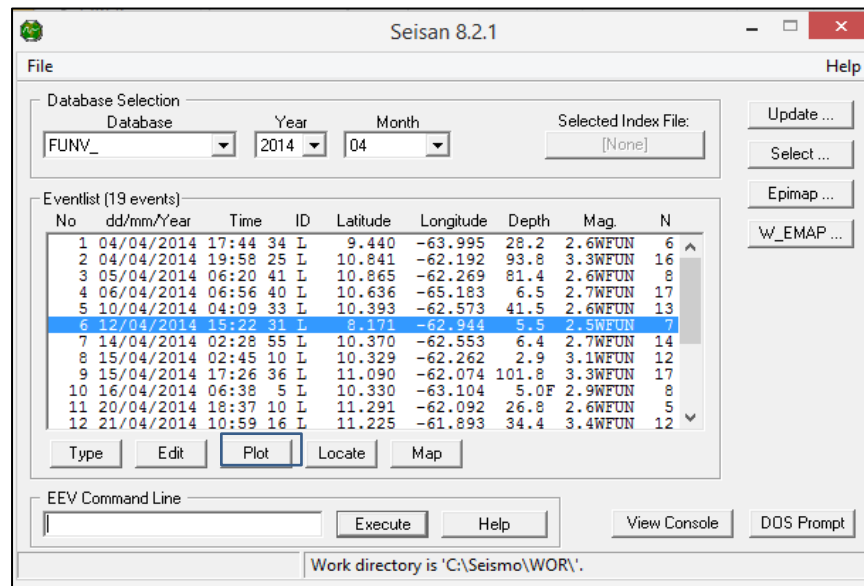


Figura 16. Listado de base de datos de eventos en ambiente Seisan

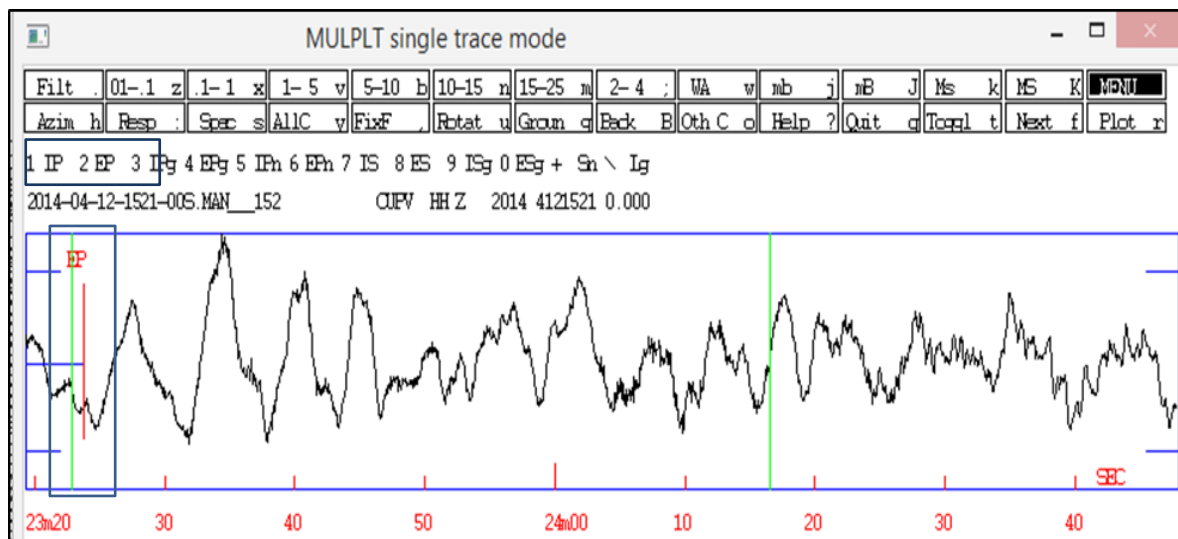


Figura 17. Traza de sismo en ambiente Seisan

1.2. Obtención de velocidad: se determina el valor buscado con la opción g (Ground), esta opción cambia la forma de onda a manera de sismograma de movimiento de suelo. Al seleccionar g, aparecerán 3 opciones, D: desplazamiento, V: velocidad y A: aceleración. Se presiona la letra V obteniendo así un valor de amplitud máxima que refleja la velocidad deseada, este valor está en nm/s. Es necesario aplicar filtros pasa banda planos predeterminados del software, que son proporcionales a la velocidad y se encuentran dentro de las frecuencias de interés ya filtradas por las características del Broad Band Sensor. Preferiblemente se utilizan filtros de frecuencias 5-10 Hz (opción b) ó 10-15 Hz (opción n) (figura 18).

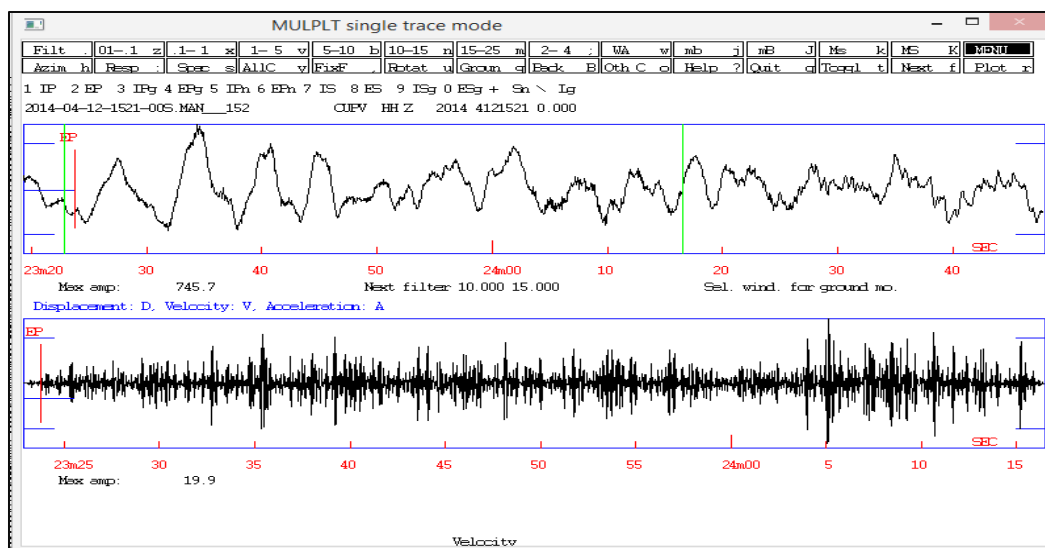


Figura 18. Ejemplo de ventana MULTPLT en Seisan

2. Obtención de factor de distancia (Q_v)

Se tiene una matriz propuesta por Fiedler (1978), (figura 19), dónde se determina el valor de Q_v , teniendo previamente los parámetros de distancia epicentral y profundidad del sismo. Para obtener un valor de Q_v que no esté determinado por valores de profundidad y distancia epicentral presentes en la matriz propuesta, se realiza una interpolación cuadrática bilineal, mediante el diseño de un código tipo función en el software MATLAB.

Dst. Kms		Distancia														
Depth	Prof.	Kms	25	50	75	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	Kms Δ
0-25	↓		6.2	6.5	7.2	7.7	8.3	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.0	10.3	10.4	
50			7.2	7.3	7.5	7.7	8.1	8.6	9.2	9.3	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	
75			6.9	7.0	7.1	7.2	7.6	8.0	8.4	8.9	9.2	9.4	9.7	9.7	9.7	
100			6.9	7.0	7.1	7.2	7.5	7.7	8.2	8.8	9.1	9.5	9.7	9.8	9.9	
125			7.2	7.3	7.3	7.4	7.7	8.2	8.2	8.5	8.7	9.4	9.7	9.7	9.7	
150			7.7	7.9	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.1	9.2	9.3	9.4	9.4	9.4	
175			7.9	8.0	8.1	8.2	8.5	8.9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.5	9.4	
200			8.0	8.1	8.1	8.2	8.7	9.0	9.2	9.3	9.4	9.4	9.3	9.2	9.1	

Figura 19. Matriz de factor de distancia Q_v propuesta por Fiedler

Determinación de distancia epicentral: se obtiene con la ubicación geográfica del epicentro y la ubicación geográfica de la estación escogida para el análisis del evento sísmico. Teniendo datos de longitud y latitud para ambos sitios, se obtiene la mínima distancia entre ellos mediante la fórmula de “Haversine”.

Una vez obtenidos los valores de Q_v y V_z , estos se introducen en la fórmula correspondiente al cálculo de MC (ecuación 2 en la sección de marco teórico), teniendo así el valor de magnitud local de Fiedler para cada sismo.

Factor de calidad Q

Se trabaja con el método de cálculo de factor Q a partir de la onda coda (Coda Q). Esto se realiza utilizando el programa que viene dentro del paquete SEISAN llamado Coda Q. Para lograr el cálculo deseado, primero se necesitan tener claros ciertos parámetros y los sismos con los cuales se trabajará. Estos se reflejan en los archivos de texto codaq.par y codaq.inp, los cuales deben encontrarse en el mismo directorio donde se está trabajando y serán explicados a continuación.

1. Archivo codaq.par

Este archivo va a contener todos los parámetros con los que el programa va a realizar el cómputo.

```
1 start in s-times
2 2.0
3 absolute start time (sec)
4 0
5 window length (sec)
6 20
7 spreading parameter
8 1.0
9 constant v in q = q0*f**v
10 1.0
11 minimum signal to noise ratio
12 2
13 noise window in front of signal and length of RMS window
14 15,5
15 minimum correlation coefficient
16 0.50
17 maximum counts to use
18 500000
19 number of frequencies
20 6
21 frequencies and bands
22 1.5,0.75
23 3,1.5
24 6,3
25 9,4.5
26 12,6
27 15,7.5
28 default stations(1. line) and components (2. line), 30a5
29 CRUV GUNV GUIV CUPV ORIV CRUV GUNV GUIV CUPV ORIV
30 BN N BN N BN N BN N BN N HH N HH N HH N HH N
31
32
```

Figura 20. Ejemplo de archivo Codaq.par

Inicio de la ventana de onda Coda (*Start in s-times*): se refiere al lugar en el tiempo que se tomará como inicio de ventana para la onda coda. Este tiempo se

define a partir del tiempo de llegada seleccionado para onda S, en este caso se toma un valor de 2, implicando este que el inicio de la ventana de onda coda será en el doble del tiempo que la llegada de la onda S (Haskov y Ottemöller, 2010).

Tiempo de inicio: si es cero, se toma el valor anterior, de lo contrario se toma como inicio de la ventana coda el valor colocado aquí (García, 2004)

Longitud de ventana: se toma un tiempo de 20 segundos para sismos someros y 30 segundos para sismos profundos (Gupta y Pant, 2003). Se seleccionan ventanas de tiempo cortas debido a que nos encontramos con sismos locales y si se toman ventanas de tiempo largas se puede alterar el cálculo ya que se estarían tomando señales propias del ruido sísmico ambiental (Haskov y Ottemöller, 2010).

Parámetro de propagación: normalmente se utiliza 1 y es el parámetro utilizado en q -ft (Haskov y Ottemöller, 2010).

Constante v utilizada en $q=q_0*f^{v}$:** los valores de $q(f)$ obtenidos se tienen a partir de q_0 ; que se calcula utilizando un valor determinado de v , al utilizar un valor de 1 no se influye en el cálculo individual de cada q (Haskov y Ottemöller, 2010).

Razón mínima de relación señal/ruido: es el mínimo valor admisible que se debe obtener para considerar aceptable el valor de q obtenido. Un valor razonable es 5 (Haskov y Ottemöller 2010).

Ventana de ruido y longitud de ventana RMS: el primer valor representa la cantidad de segundos que se tomarán para evaluar el ruido al inicio de la señal, mientras que el segundo valor representa la ventana de tiempo que se utiliza para calcular la relación señal/ruido. Se tienen valores predeterminados del programa de 15 y 5 segundos respectivamente.

Mínimo coeficiente de correlación: con el fin de obtener un valor promedio de q que sea aceptable, el coeficiente de correlación de coda q fit debe ser mayor a este parámetro establecido, en este sentido, se tiene que 0.5 es un valor aceptable (Haskov y Ottemöller, 2010).

Máxima cantidad de cuentas a utilizar: Si en la ventana de la coda este valor es sobrepasado, la ventana no es aplicada. Esto para evitar el fenómeno conocido como clipping, es decir, evitar el agotamiento del rango dinámico del sistema.

Número de frecuencias: se recomienda usar hasta un máximo de 8.

Frecuencias y bandas: son las frecuencias y bandas centradas con las que se desea filtrar la señal con el filtro pasabanda Butterworth de 6 polos. Se utiliza un rango de frecuencias que tenga valores altos y bajos para así abarcar todos los niveles de la señal.

Estaciones y componentes: se deben introducir los nombres de las estaciones y la componente de la señal que se va a procesar para obtener el valor de Q .

2. Archivo codaq.inp

Este archivo debe encontrarse, al igual que codaq.par, en el mismo directorio en el que se está trabajando. Debe contener la dirección de los archivos S de los sismos que serán evaluados durante la ejecución del programa Coda Q.

1	1 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\01\05-0337-00L.S201001
2	2 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\02\02-1119-00L.S201002
3	3 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\02\13-0604-00L.S201002
4	4 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\04\13-2224-30L.S201004
5	5 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\04\23-1739-00L.S201004
6	6 C:\Seismo\REA\FUNV_2010\05\02-2122-00L.S201005

Figura 21. Ejemplo de archivo codaq.inp

3. Ejecución del programa Coda Q

Cuando el programa empieza a correr, se despliegan en pantalla el sismograma del evento en análisis, con sus respectivas marcas de tiempo de inicio y la ventana coda; esto para cada frecuencia seleccionada para obtener el resultado del valor de Q.

Los resultados numéricos se encuentran en los archivos codaq.out y codaq1.out, siendo el primero un archivo donde se muestran los detalles de los cálculos para cada sismo, mientras que el segundo presenta un resultado general del valor de Q. Ambos se generan automáticamente en el directorio donde se está trabajando.

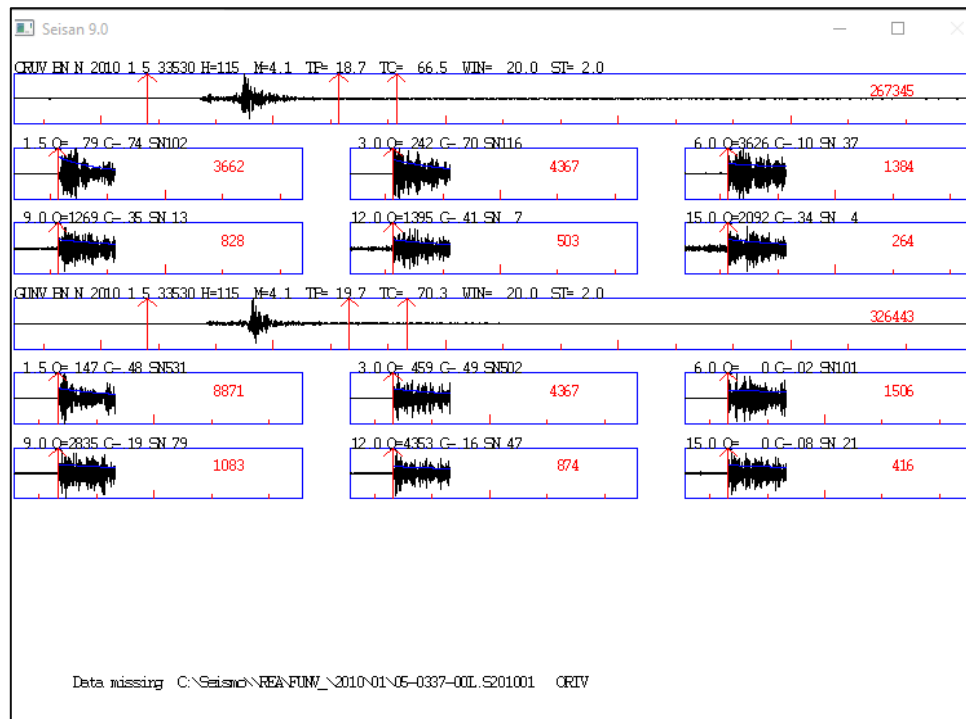


Figura 22. Resultado ejemplo tras ejecución del programa CODAQ

Cálculo de magnitud de momento (Mw)

1. Archivo MULPLT.DEF

Ubicado dentro de la carpeta DAT, la cual es creada automáticamente al momento de instalar SEISAN. En este archivo se establecen todos los parámetros con los que se ejecutará el complemento MULPLT, siendo este el que llevará a cabo el cálculo de Mw. Para efectos de éste cómputo, se modificarán solo dos parámetros dentro del archivo mencionado, específicamente, el factor Q y el valor de alfa (α) (calculados anteriormente), (figura 23).

7	KEYWORD.....	Comments.....	Par 1.....	Par 2
8	X_SCREEN_SIZE	Size in pixels	90.0	
9	PHASE NAME KEY	Phase key and phase		
10	PHASE NAME KEY			
11	PHASE WEIGHT KEY	Weight key and weight		
12	PHASE MOUSE KEY	Mouse key character		
13	SPECTRAL Q0	Q0	89.0	
14	SPECTRAL QALPHA	Q = Q0**Qalpha	0.84	
15	SPECTRAL KAPPA			
16	SPECTRAL P-VELOCITY	P velocity	6.2	
17	SPECTRAL S-VELOCITY	P velocity	3.6	
18	SPECTRAL DENSITY	Density		
19	3COMP VELOCITY	velocity for 3 comp		
20	RESOLUTIONX	# points pl. screen	1500.0	
21	RESOLUTIONHC	# points pl. hc	3000.0	
22	NSORT_DISTANCE	0: no sort, min ph.		
23	SPECTRAL F-BAND		0.01	20.0
24	AUTO_LOCATE	0,1,2 0,1,2	0.0	2.0
25	AUTO_PROCESS	0,1,2 name	0.0	1s
26	SPECTRAL OUTPUT		1.0	
27	ML LOW CUT AND POLES		1.25	8.0
28	ML HIGH CUT AND POLES		20.	8.0
29	BANDPASS FILTER			
30	AUTOCODA FILTER		0.1	10.0
31	AUTOCODA STA		3.0	
32	AUTOCODA RATIO		1.2	
33	CODA AUTO		0.0	
34	PHASE NAME KEY			
35	PHASE MOUSE KEY			
36	SPECTRAL Q0			
37	SPECTRAL QALPHA			
38	### Set Filter type 0 for bndpas 1 for recfil routine			
39	FILTER TYPE		0.0	
40	### Setup user-defined filters			

Figura 23. Ejemplo de archivo MULPLT.DEF

2. Ejecución de MULPLT

Con este programa es posible graficar trazas, seleccionar fases, realizar análisis espectrales, correcciones por respuestas de instrumentos, entre otras funciones. En este caso, se obtendrá un valor de M_w a partir del análisis espectral de las trazas de un registro sísmico.

Es necesario graficar las trazas de las distintas estaciones a las que se les realizará el cálculo, de igual manera que se explica en la sección de cálculo de magnitud de Fiedler. Una vez que se tiene el registro con el que se desea trabajar, se selecciona la opción spec en el menú que aparece en la ventana o simplemente se presiona la letra s en el teclado, figura 24.

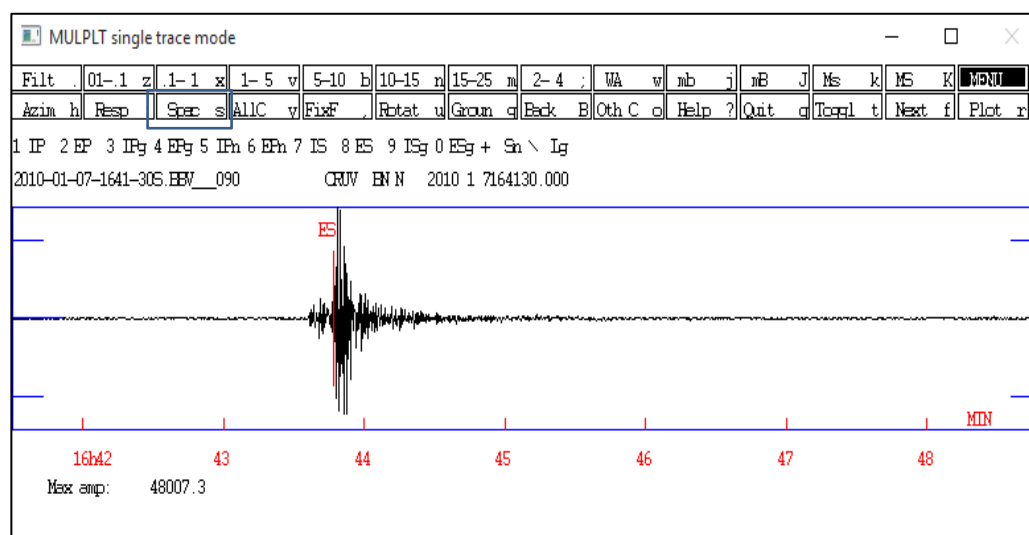


Figura 24. Ventana MULPLT con traza de sismo en ambiente Seisan

Una vez hecho esto, el programa requerirá que el usuario seleccione una ventana para realizar el análisis, es recomendable seleccionar una ventana que inicie un poco antes de la llegada de la fase de onda S, y culmine un poco después de la misma. Posteriormente, el programa generará una serie de opciones relacionadas al tipo de análisis que se puede obtener, en este caso se selecciona la opción de desplazamiento, presionando la letra “d” en el teclado, (figura 25).

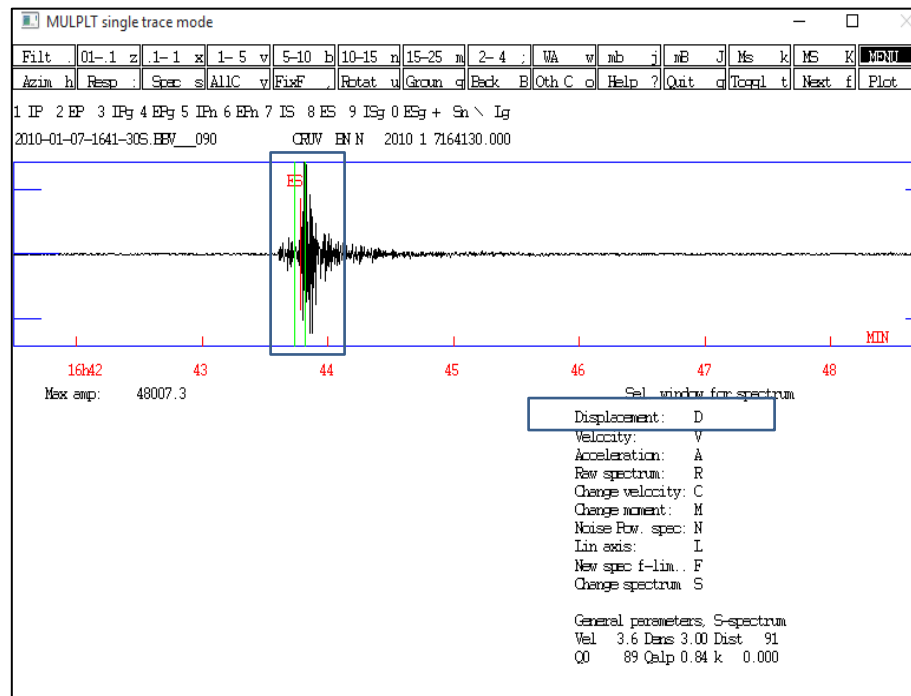


Figura 25. Ventana MULPLT, selección de ventana para espectro

Ahora se tendrá en pantalla un gráfico que refleja frecuencia (Hz) en el eje x, y logaritmo de la amplitud en el eje y.

En este momento es necesario que el usuario seleccione 3 puntos en la gráfica mencionada, haciendo clic con el ratón, primero se deben tomar dos puntos alineados sobre la parte de la gráfica que presente un comportamiento plano y constante, ubicando el último de estos puntos donde se observe un cambio de tendencia o descenso drástico de la línea observada; finalmente se debe generar un tercer punto en el límite inferior derecho de la gráfica.

La idea es obtener la misma tendencia que posee la línea generada por el análisis espectral, haciendo uso de tres puntos posicionados por el usuario, figura 26.

Y en este punto es posible obtener un valor de Mw para el sismo seleccionado en una estación específica, solo hace falta presionar la letra “s” en el teclado y automáticamente aparecerá un valor de Mw debidamente identificado.

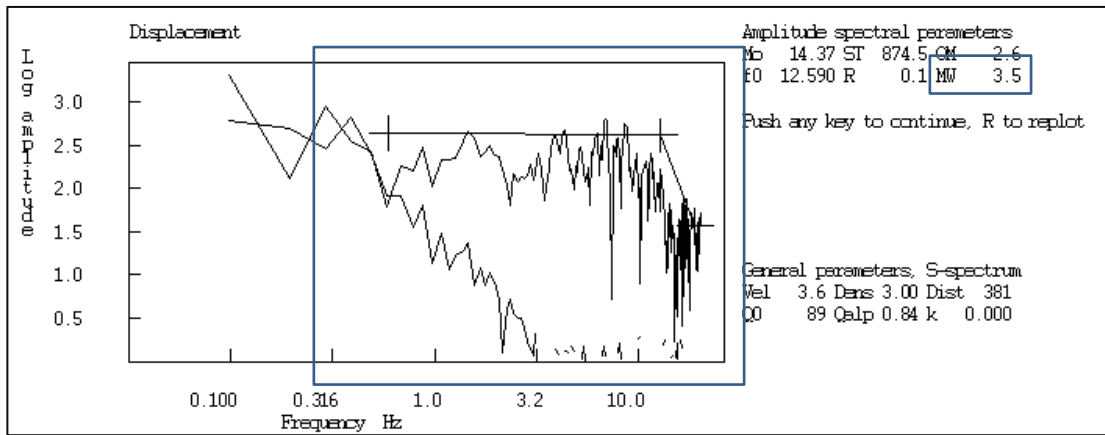


Figura 26. Resultado de ejecución de análisis espectral a una traza de un sismo

4. Calibración entre magnitudes

- Para encontrar la correlación entre magnitud MC y magnitud Mw, es necesario graficar de manera de dispersión cada sismo con ambos valores asignados.
- Una manera de lograr esto es utilizando el software MatLab o también con Microsoft Excel.
- Ya con la gráfica elaborada -ejemplo figura 27-, es necesario obtener una línea de tendencia o ajuste lineal.
- Esta línea buscará la mejor correlación entre ambas variables, y mediante el proceso de regresión lineal generará una ecuación que involucre a ambas, haciendo una variable “y” dependiente de una variable “x”.

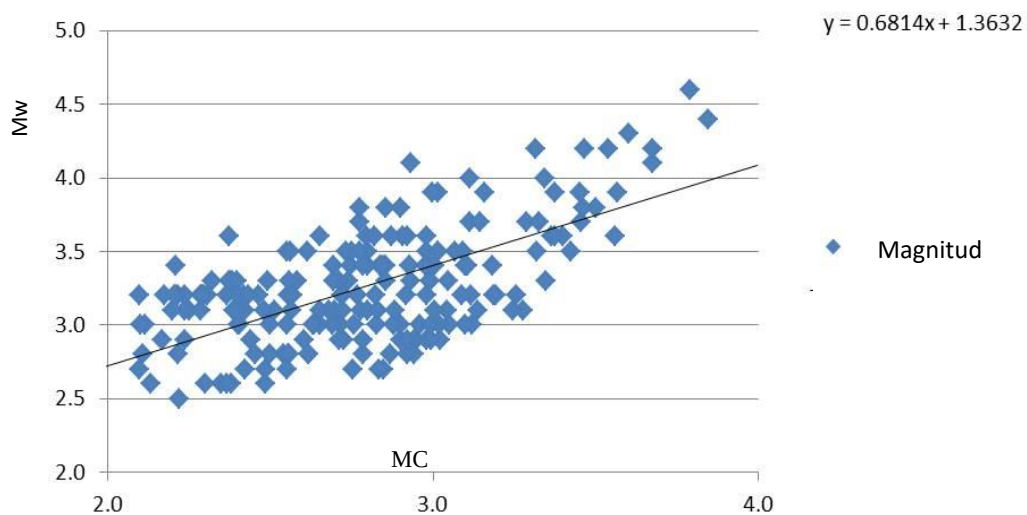


Figura 27. Correlación lineal entre MC y Mw con ecuación de línea de ajuste.

CAPÍTULO V

Resultados y análisis

En el presente estudio se analizó una muestra de 210 sismos de magnitud M_w mayor a 2.5 ocurridos en los años 2010, 2013 y 2014, obteniéndose para cada uno los valores de magnitud de Fiedler y magnitud de momento.

Estos sismos fueron registrados por cinco estaciones sismológicas: CRUV, GUIV, GUNV, ORIV Y CUPV; cuyas abreviaciones corresponden a las poblaciones de Carúpano, Güiria, Guanoco, Oritupano y Cúpira respectivamente, dado que las mismas presentaban los mejores registros al momento de realizar un análisis.

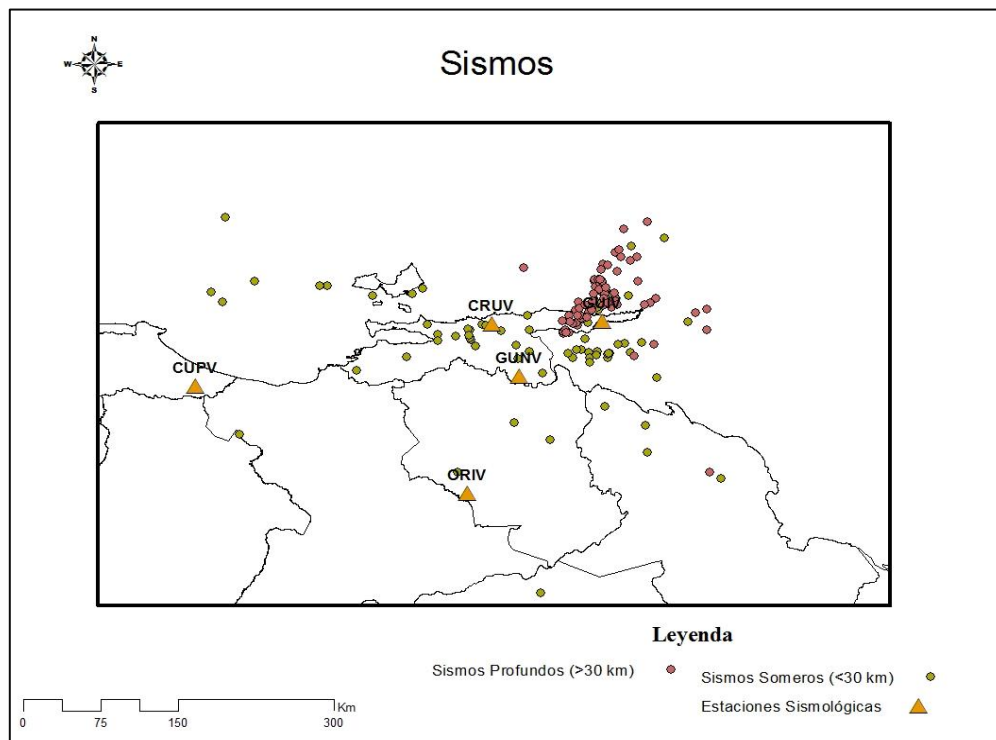


Figura 28. Mapa con ubicación de epicentros de los sismos analizados y estaciones sismológicas.

Con el fin de actualizar los valores de magnitud de momento en correspondencia con un modelo Q propio de la región, trabajamos con dos grupos de sismos, a saber: sismos con profundidad menor a 30 km (someros) y sismos con profundidad mayor a

30 km (profundos). Cada grupo se trabajó con su valor correspondiente y obtenido de Q

Magnitud de Fiedler (MC)

Para todos los sismos ubicados dentro de la ventana geográfica dispuesta se obtuvo un valor de magnitud de Fiedler. Se calcularon todos los parámetros necesarios, específicamente:

- V_z : velocidad vertical de partículas del suelo
- Distancia epicentral
- Q_v : factor de distancia

Todos los valores obtenidos para cada parámetro se reportan en la tabla 5 en el apéndice.

Con un estudio estadístico de los valores obtenidos se observa que los datos generados tienen un comportamiento unimodal, teniendo un máximo valor de 4.4 y un mínimo de 1.9.

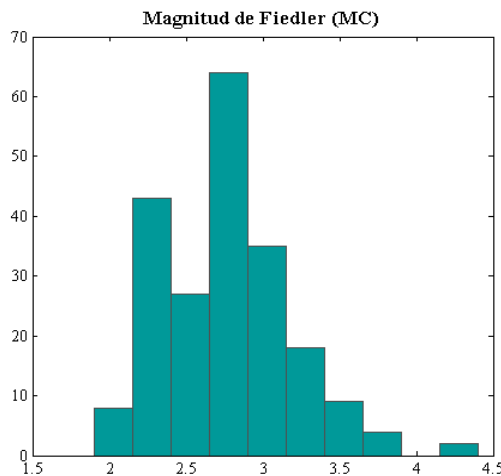


Figura 29. Histograma para valores obtenidos de magnitud de Fiedler (MC).

Tabla 1. Datos estadísticos para 210 valores de magnitud de Fiedler

Parámetro estadístico	Valor
Moda	2.8
Promedio	2.8
Mediana	2.8
Desviación típica	0.42
Desviación absoluta de la mediana	0.30

1. Factor de calidad Q

A través de la ejecución del programa CODAQ del ambiente Seisan, el cual se basa en el análisis de ondas coda, se obtuvieron valores promedio de Q_0 y α , para sismos someros (profundidad menor a 30 km) y sismos profundos (profundidad mayor a 30 km), en un rango de frecuencias desde 1.5 a 15 Hz, específicamente:

2.1.Sismos someros (profundidad < 30 km):

Para este grupo de eventos se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 2. Valores de factor Q obtenidos para sismos someros

Q_0	70
α	0.81

Lo que permite expresar la ecuación 5 de la sección de teoría de la siguiente manera:

$$Q(f) = (70 \pm 2) f^{(0.81 \pm 0.01)}, 1.5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$$

Tomando sólo los valores de sismos someros en la zona oriental del país reportados en el trabajo de García (2004) y que fueron registrados en las mismas estaciones utilizadas en la presente investigación, se obtiene un valor promedio de $Q_0 = 64$ y $\alpha = 0.89$. Estos valores son similares a los determinados en este trabajo, con $Q_0 = 70$ y $\alpha = 0.81$.

Es importante resaltar que estos valores resultan de una distribución no uniforme de los sismos en la región de estudio y por lo tanto están más influenciados por las zonas con mayor cantidad de datos, fig. (28).

En el mapa (figura 30) se observa que la mayoría de los epicentros están concentrados en las costas del estado Sucre, lo que concuerda con lo esperado al tomar en cuenta el ambiente tectónico de esta zona.

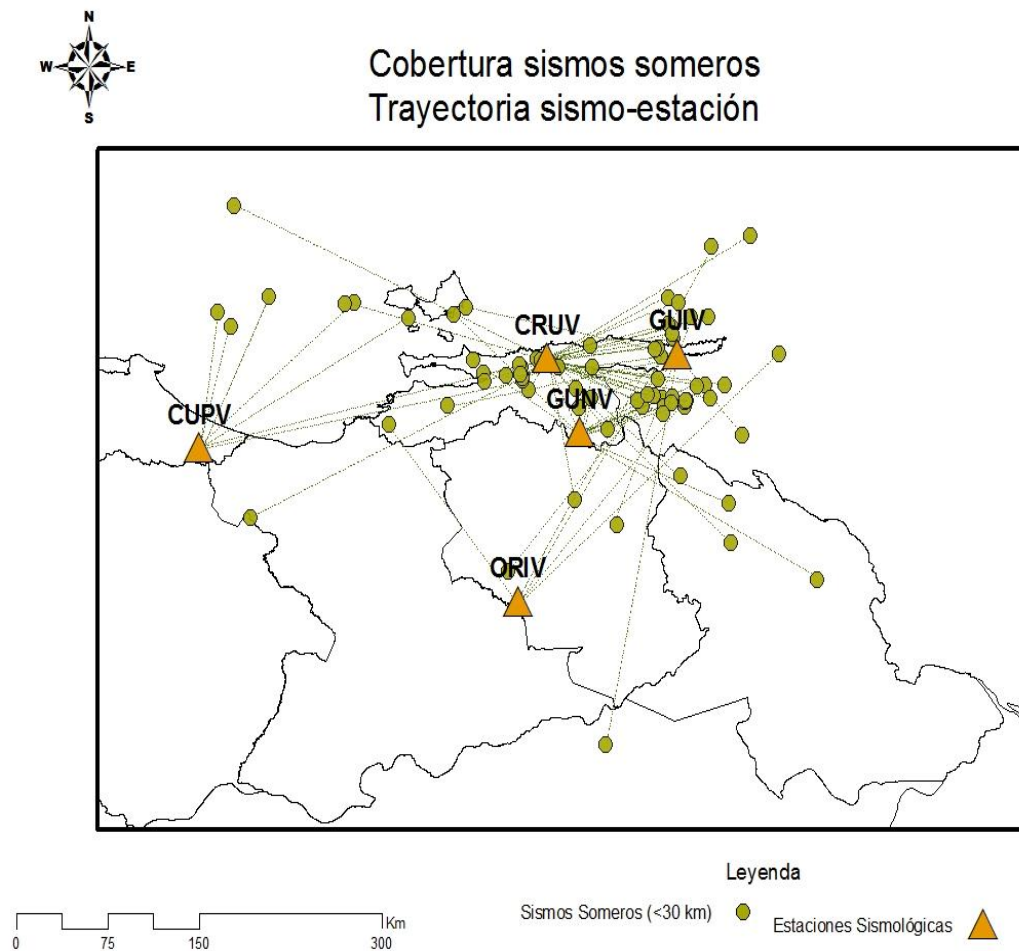


Figura 30. Mapa de cobertura de factor de calidad Q para sismos someros

2.2.Sismos profundos (profundidad > 30 km):

Para sismos profundos se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 3. Valores de factor Q obtenidos para sismos profundos

Q ₀	89
A	0.84

Lo que permite expresar la ecuación 5 de la sección de teoría de la siguiente manera:

$$Q(f) = (89 \pm 5)f^{(0.84 \pm 0.03)}, 1.5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$$

Al comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con los expuestos en la investigación de García (2004), encontramos que para las estaciones que coinciden en los estudios, García (2004) obtuvo un valor promedio de Q₀ para sismos profundos en la región oriental de 81.5 y un α de 0.88, cifras que concuerdan muy bien con las obtenidas en este trabajo.

De igual manera que para sismos someros, para sismos profundos también se tiene un mapa de cobertura de factor de calidad Q (figura 31). Resaltando en la zona costera hacia el noreste del estado Sucre la mayor concentración de sismos, consecuencia de la actividad tectónica allí presente.

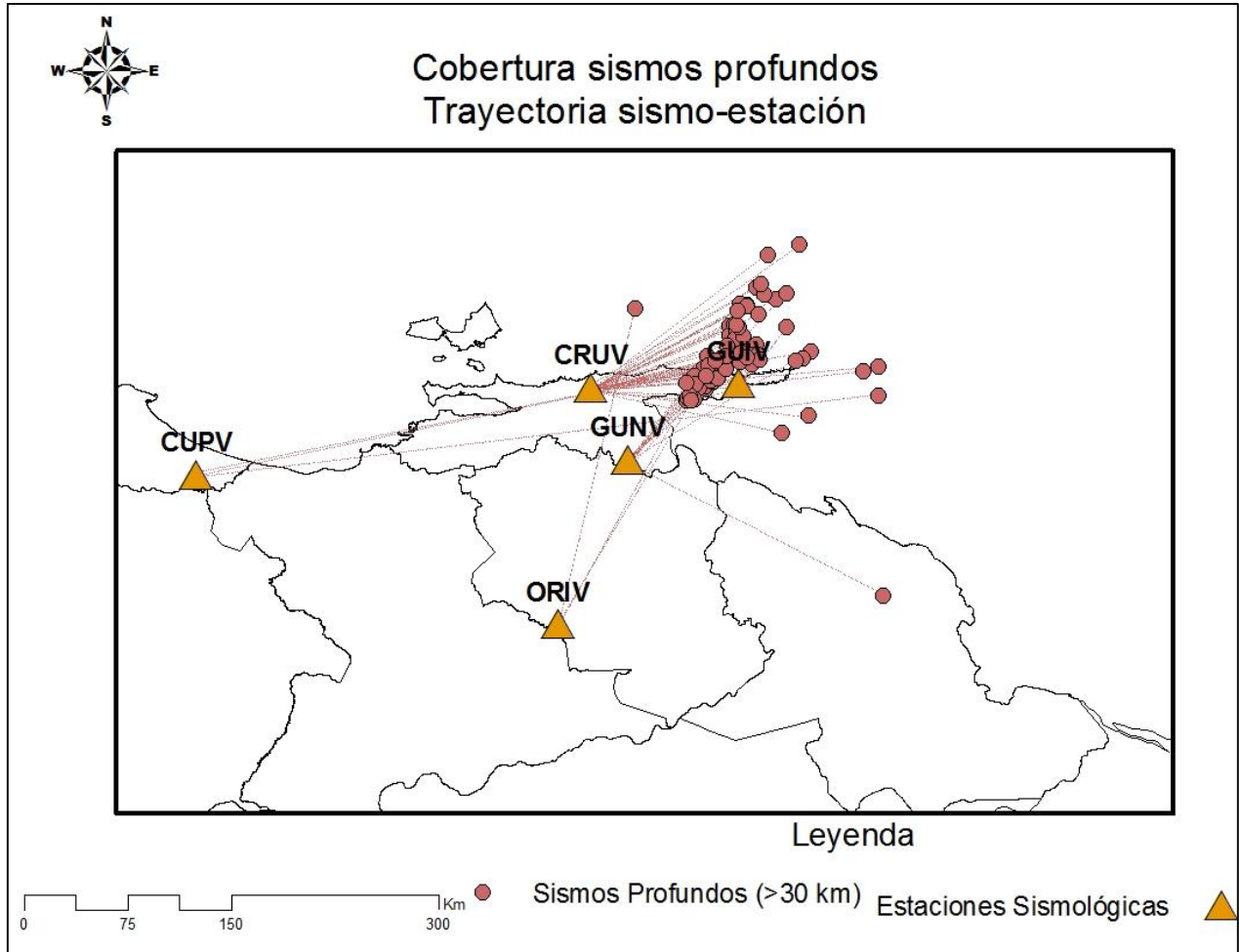


Figura 31. Mapa de cobertura de factor de calidad Q para sismos profundos

Al comparar los valores de factor de calidad Q se observa que los sismos someros tienen un factor de calidad menor que los profundos.

3. Magnitud de momento (M_w)

Con los valores de Q obtenidos se hizo un recálculo de magnitud de momento para todos los sismos que ocurrieron en la ventana geográfica con un M_w anterior mayor a 2.5.

Esto fue necesario ya que actualmente se realiza este cómputo con un valor de factor de calidad Q de 400, lo que no tiene congruencia con los valores esperados para esta zona. Así se asegura tener valores de M_w más acertados y óptimos.

Cada sismo con sus respectivos valores de M_w calculado y M_w anterior están reflejados en la tabla 5 en el apéndice.

Para los nuevos valores se tiene un histograma reflejado en la figura 32, es posible observar un comportamiento unimodal, esta magnitud tiene un valor máximo de 4.9 y un valor mínimo de 2.5. Los distintos parámetros estadísticos se encuentran en la tabla 4.

Los valores de M_w obtenidos en este trabajo, en su mayoría, tienen un comportamiento relativamente mayor a los valores encontrados en la base de datos anterior.

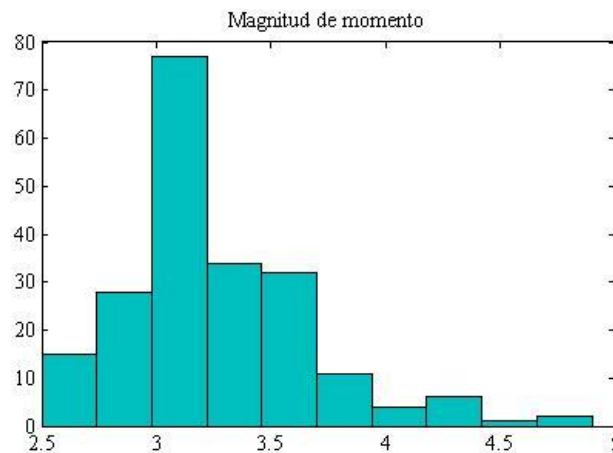


Figura 32. Histograma para valores de magnitud de momento

Tabla 4. Datos estadísticos para 210 valores de magnitud de momento.

Parámetro estadístico	Valor
Moda	3.2
Promedio	3.3
Mediana	3.2
Desviación típica	0.42
Desviación absoluta de la mediana	0.20

4. Relación empírica MC- M_w

Se realizó un gráfico cruzado con los valores de magnitud de momento contra magnitud de Fiedler de cada sismo para determinar visualmente la posible relación entre ambas, fig. (33). Por la distribución de puntos se consideró adecuada una relación mediante una recta, cuyos parámetros se calcularon por regresión lineal, obteniéndose la siguiente función:

$$M_w = (0.68 \pm 0.14) * MC + (1.4 \pm 0.05) \quad (\text{Ec. 9})$$

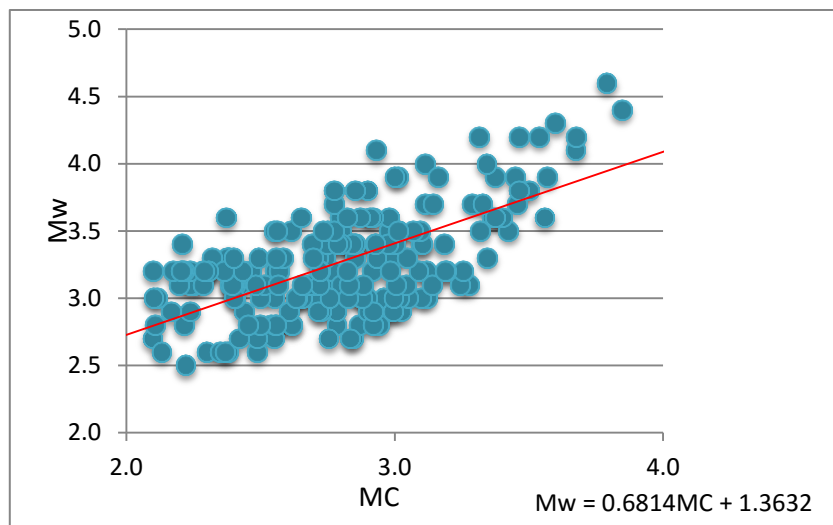


Figura 33. Gráfico M_w vs MC para sismos en el oriente de Venezuela con ajuste lineal

La correlación entre ambos conjuntos de datos tiene como valor 0.68158.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio logró estimar una relación entre magnitud de momento M_w y magnitud local de Fiedler MC para sismos ocurridos en el oriente venezolano en los años 2010, 2013 y 2014; expresada en la siguiente ecuación:

$$M_w = (0.68 \pm 0.14) * MC + (1.4 \pm 0.05)$$

Este ha sido el primer trabajo realizado en el oriente del país con el fin de homologar valores de magnitud. Con los resultados obtenidos es posible transformar de manera directa valores de magnitud de Fiedler, presentes en registros de sismos históricos, a valores expresados utilizando la escala de magnitud de momento. Esto permitirá en un futuro disponer de un catálogo sísmico homologado para esta zona y así mejorar los estudios de amenaza sísmica los cuales son realizados con el fin de minimizar daños tras la ocurrencia de un evento sísmico mayor.

Para llegar a esta relación, fue necesario calcular ambas magnitudes para todos los eventos seleccionados, dentro de los siguientes límites

$$1.9 \leq MC \leq 4.4 \text{ y } 2.5 \leq M_w \leq 4.9$$

Esto nos indica que la relación estimada es válida para este rango de magnitudes.

Para obtener los valores de magnitud de momento fue necesario determinar valores de factor de calidad Q, el cual determina la atenuación de las ondas sísmicas en el subsuelo. Para este fin se dividieron los sismos según su profundidad, agrupándolos como sismos someros aquellos con profundidad de hipocentro menor a 30 km y sismos profundos aquellos con profundidad mayor a 30 km.

Para sismos someros se obtuvo la siguiente ecuación para ley de dependencia frecuencial promedio

$$Q(f) = (70 \pm 2) f^{(0.81 \pm 0.01)}, 1.5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$$

Mientras que para sismos profundos,

$$Q(f) = (89 \pm 5) f^{(0.84 \pm 0.03)}, 1.5 \leq f \leq 15 \text{ Hz}$$

Es necesario recalcar que los valores de Q obtenidos abarcan un área de cobertura que viene dada por las zonas con mayor ocurrencia de sismos, específicamente la costa nororiental, con una mayoría de eventos concentrados en las adyacencias del estado Sucre en la localidad de Güiria.

Esto es consecuencia de la actividad tectónica que gobierna el nororiente venezolano, siendo la actividad de la falla El Pilar el principal motor sismogénico para esta área del territorio nacional.

Con los resultado de factor Q alcanzados, se comprobó que a mayor profundidad en el subsuelo es menor la atenuación de las ondas coda, por ello para sismos someros se esperan valores Q menores que para eventos profundos para este tipo de ondas.

Dado que los valores de Q alcanzados representan un promedio, es recomendable plantear investigaciones futuras que involucren estudios más detallados para esta región.

Fue posible verificar que los nuevos valores de Q obtenidos impactan el cómputo de la magnitud de momento M_w , de modo tal que se observa de manera sistemática un incremento en la magnitud, como es ejemplo el sismo de mayor magnitud M_w registrada (4.9) específicamente el sismo del 12/10/2013 2:10 (detallado en la tabla 5 en el apéndice); el cual tenía un valor asignado de 4.7 y aumentó en 0.2.

En los casos puntuales en los que no se produjo un aumento en el valor de magnitud M_w , es recomendable realizar con estos una revisión por un analista con más experiencia en la lectura del nivel de amplitud a frecuencia cero.

El oriente de Venezuela ha sido históricamente afectado por terremotos los cuales han dejado como consecuencia cifras importantes de pérdidas humanas y materiales, es por esto que es de suma importancia la continuación de trabajos de investigación

científica en el campo de la sismología colocando la ingeniería al servicio de la sociedad, lo cual debe ser su misión primera.

Es recomendable afianzar la enseñanza de la sismología, una rama importante de la geofísica, que muchas veces es relegada a un segundo plano, no considerando la importancia de la prevención en cuanto a amenaza sísmica ya que los beneficios económicos no son tangibles.

Los resultados obtenidos resaltan la importancia de la existencia de instituciones como FUNVISIS, la cual de la mano con las universidades nacionales y todo su personal experto en diferentes áreas, buscan beneficios para el país. Sin embargo, actualmente no están siendo reconocidos de la forma que su labor merece.

BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1981) Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, pp 1687-1700
- Aki, K. y Chouet, B. (1975) Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. Journal of geophysical research, Vol. 80, No. 23
- Allmann, B., Edwards, B., Bethman, F., Deichmann, N., Clinton, J., Fäh, D. y Giardini, D. (2011) A new empirical magnitude scaling relation for Switzerland. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 6, pp. 3088–3095
- Audemard, F. (2000) Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela. Recuperado de www.funvisis.gob.ve
- Audemard, F. (2002) Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos xix y xx revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. XI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas
- Audemard, F. (2006) Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. Tectonophysics 424, pp 19–39
- Audemard, F. (2011) Multiple-Trench investigations across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela after the 1997 Cariaco earthquake. The Geological Society Of America, Special Paper 479
- Beltrán, C. (1994) Trazas activas y síntesis geotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000. Memorias del VII Congreso Venezolano de Geofísica, pp. 541 - 547
- Fiedler, G. (1978) Survey of practice in determining magnitudes of near earthquakes, Part 1: North, Central and South America. USGS, Reporte 9, p. 94

- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) (2015) Información en línea recuperada de www.funvisis.gob.ve
- García, S. (2004) Determinación del factor de calidad Q para Venezuela. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad Simón Bolívar
- Gupta, S. y Pant, C. (2003) Coda Q estimates for Kumaun Himalaya. Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee
- Haskov, J., Malone, S., McClurg, D. y Crosson, R. (1989) Coda Q for The State of Washington. Bulletin of The Seismological Society Of America, Vol. 79, No. 4, pp. 1024-1038
- Havskov, J. y Ottemöller, L (2010) Routine data processing in earthquake seismology. Editorial Springer
- Jin, A. y Aki, K. (1989) Spatial and temporal correlation between coda Q and seismicity and its physical mechanism. Journal of Geophysical Research, 94(B10): 14041–14059
- Kumar, N. Parvez, I. y Virk, H. (2005) Estimation of coda wave attenuation for NW Himalayan region using local earthquakes. Physics of the Earth and Planetary Interiors 151, pp 243–258
- McCalpin, J. (2009) Earthquake magnitude scales. GEO-HAZ Consulting. Estados Unidos
- Mitchell, B. (1981) Regional variation and frequency dependence of Q in the crust of the United States. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, pp 1531-1538
- Pailoplee, S., Sugiyama, Y. y Charusiri, P. (2009) Probabilistic seismic hazard analysis in Thailand and adjacent areas by using regional seismic sources zones. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 21, No. 5, pp 757-766

- Papazachos, B., Kiratzi, A., y Karacostas, B. (1997) Toward a homogeneous moment-magnitude determination for earthquakes in Greece and the surrounding area. Bulletin of The Seismological Society Of America, Vol. 87, No. 2, pp 474-483
- Reiter, I. (1990) Earthquake hazard analysis. Columbia University Press, 254 pp
- Schubert, C. (1979) El Pilar fault zone, Northeastern Venezuela: Brief Review. Tectonophysics 52, pp 447-455
- Scordilis, E. (2006) Empirical global relations converting Ms and Mb to moment magnitude. Journal of Seismology 10, pp 225-236
- Shearer, P. (2009) Introduction to Seismology, Segunda Edición. Cambridge University Press, 412 p
- Suckale, J., Grünthal, G., Regnier, M. y Bosse, C. (2005) Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Vanuatu. Scientific Technical Report 05/16
- United States Geological Survey (USGS) (2015) Información en línea recuperada de www.usgs.gov
- Vásquez, R. (s.f) Aporte De La Red Sismológica Nacional En La Evaluación De La Amenaza Sísmica De Venezuela. FUNVISIS. Recuperado de www.funvisis.gob.ve

APÉNDICE

Tabla 5. Sismos analizados con respectivos valores obtenidos de velocidad vertical (Vz), distancia epicentral, factor de distancia Qv, magnitud de Fiedler y magnitud de momento.

Sismo	Vz (nm)	Distancia epicentral (km)	Profundidad (km)	Qv	Mw (antigua)	MC	Mw
02/01/2010 2:15	225.5	100.7	78.4	7.2027	2.8	2.1	3.0
05/01/2010 3:35	11131	86.88	115.2	7.2691	4.1	2.9	3.2
07/01/2010 3:35	1275	94.01	27.6	7.5871	2.6	2.8	3.0
20/01/2010 8:16	1636	79.01	57.4	7.4089	2.6	2.8	3.5
02/02/2010 11:17	1439	127.5	102.7	7.3041	3.2	2.8	3.2
04/02/2010 9:25	1735.5	57.63	16.4	6.7136	2.8	2.9	3.0
13/02/2010 6:04	3236.5	24.03	79	6.9	3.0	2.8	3.1
21/02/2010 2:18	3194	31.98	2.3	6.2838	2.8	2.2	2.9
05/03/2010 21:46	31.7	132.2	6.6	7.8932	3.1	2.6	3.5
10/03/2010 8:00	7982	63.03	5.7	6.8648	2.9	2.4	3.1
20/03/2010 14:14	420	76.8	79.1	7.1072	2.5	2.2	2.5
26/03/2010 18:14	4234.7	84.27	85.5	7.1371	2.9	2.9	2.9
08/04/2010 16:06	2322.1	25.41	57.9	7.1068	2.7	3.4	3.5
16/04/2010 0:53	600.3	105.6	65.6	7.4104	2.6	3.0	3.9
23/04/2010 17:38	1938.4	294	88.9	7.8159	3.1	2.9	2.8
24/04/2010 4:12	791.3	121.4	105.2	7.3058	2.6	2.9	3.3
30/04/2010 19:17	281.3	128.2	2.3	7.8692	3.1	2.4	3.0
02/05/2010 21:20	8577.5	113.1	92.6	7.2432	2.7	2.4	3.1
05/05/2010 23:28	1654.7	24.98	5	6.2	2.8	2.5	3.2
07/05/2010 6:54	463.9	247.5	16.1	8.6325	2.9	3.0	2.9
14/05/2010 18:48	516.4	54.48	4.1	6.6254	2.5	2.3	3.2
21/05/2010 2:42	692.2	118.9	78.9	7.2727	3.1	2.6	3.3
03/06/2010 8:27	4448.1	76.7	15	7.234	3.0	2.2	3.2
07/06/2010 3:25	853	33.44	99.7	6.9338	2.6	2.6	3.2
17/06/2010 23:59	4877.9	21.72	15	6.2	2.5	2.4	3.2
19/06/2010 13:21	242.3	181.5	26.7	8.1779	2.7	2.6	3.0
27/06/2010 5:17	54.1	193.2	6.3	8.2592	3.1	2.9	3.4

05/07/2010 10:32	328.7	95.25	11.9	7.605	2.7	2.8	2.7
09/07/2010 20:50	905.8	166.3	36	8.0395	3.3	3.6	3.6
09/07/2010 21:09	306.7	160.7	35.7	8.0122	2.6	2.3	2.6
16/07/2010 23:48	3719.5	7.5	57.4	7.1112	2.6	2.4	2.9
29/07/2010 13:24	1345	95.1	86.6	7.1804	2.7	2.5	2.8
08/08/2010 5:34	25.1	299.4	1.3	8.9958	2.9	3.2	3.1
13/08/2010 23:50	2923.5	130.8	19.4	7.8848	2.6	2.5	2.8
14/08/2010 8:40	13192.2	139	123.2	7.5026	3.0	3.1	3.2
18/08/2010 23:31	2589.2	101.4	5	7.7084	2.7	2.8	3.1
28/08/2010 2:27	218.6	151	101.3	7.3634	4.1	3.6	4.3
03/09/2010 14:04	8095.4	14.9	73.2	6.9216	2.5	2.9	2.9
04/09/2010 17:32	894	78.03	24.3	7.2606	3.0	2.7	3.2
12/09/2010 13:21	319.2	107	66.6	7.396	2.7	2.4	2.7
17/09/2010 14:24	254.9	121.2	8	7.8272	3.3	3.0	3.4
20/09/2010 11:26	205.2	174.3	15.7	8.1458	2.5	2.6	2.7
22/09/2010 19:50	375.7	196.5	5	8.279	3.2	3.1	3.7
30/09/2010 3:25	260.8	199.9	17.7	8.2994	3.2	3.2	3.2
01/10/2010 18:56	239.8	229.5	32.2	8.4319	3.9	3.3	4.0
10/10/2010 20:01	311	73.95	136	7.6062	2.7	2.8	2.7
20/10/2010 23:09	2170	21.95	85.1	6.9	3.2	3.1	3.5
24/10/2010 5:55	2073.5	85.48	69.4	7.2409	2.8	2.9	3.1
27/10/2010 20:25	655.7	133.1	98.9	7.3008	2.8	3.0	2.9
10/11/2010 23:27	228.9	123	102	7.285	2.6	2.2	2.8
24/11/2010 2:01	87.2	264.4	34.8	8.6219	2.9	3.1	3.4
29/11/2010 1:00	4471.3	31.47	97.1	6.9259	3.0	2.6	3.1
06/12/2010 10:29	169.9	188.9	27	8.2192	3.9	3.1	4.0
06/12/2010 11:10	283	110.7	13.8	7.7642	2.7	2.7	3.2
27/12/2010 0:00	10870	90.06	47.4	7.6081	2.6	3.0	3.3
06/01/2013 6:14	3710.5	57.49	42	7.1519	2.7	2.9	3.3
17/01/2013 5:03	313.3	133.3	100	7.2999	2.8	3.2	3.2
24/01/2013 17:06	1241	136.6	101	7.3178	2.8	2.4	3.1
02/02/2013 5:08	27.1	455.5	87.2	8.607	3.3	2.7	3.4
04/02/2013 1:33	1643.4	73.93	86.7	7.0957	3.0	3.2	3.4
04/02/2013 15:47	7077	62.86	5	6.8601	2.8	2.1	2.8
15/02/2013 8:00	1611.9	43.53	100.8	6.9837	2.6	3.1	3.0

27/02/2013 7:14	677.2	80.05	91.8	7.1202	2.9	2.9	3.6
01/03/2013 13:21	1783.1	85.02	5	7.4004	2.7	2.7	3.0
04/03/2013 13:21	32	491.5	32.3	9.4271	3.0	2.7	3.1
08/03/2013 23:43	1940.1	83.76	5.8	7.3752	3.3	2.8	3.4
09/03/2013 7:21	4694.6	63.08	27.4	6.9179	4.0	3.7	4.1
11/03/2013 0:00	518.1	98.09	3.1	7.6618	2.5	2.9	3.0
17/03/2013 21:28	253	127	77.6	7.3052	2.8	3.3	3.1
25/03/2013 7:10	272.9	134.6	44.4	7.8539	2.6	2.8	3.0
29/03/2013 10:24	1051.6	116.1	98.7	7.2491	2.7	2.1	3.2
31/03/2013 12:15	3092.3	20.38	79.9	6.9	3.3	2.6	3.3
01/04/2013 21:07	3192.4	41.57	4.2	6.3988	3.9	3.8	4.6
02/04/2013 4:49	1208.1	89.52	5	7.4904	2.7	2.4	3.6
03/04/2013 16:19	428.5	192.6	9	8.2556	3.0	2.7	3.5
13/04/2013 0:24	139	405.3	74.4	8.4452	2.9	2.6	3.2
08/05/2013 18:39	29.4	432.9	5	9.3658	3.0	3.0	3.4
09/05/2013 11:37	61.1	239.5	7.3	8.5765	3.5	2.9	4.1
17/05/2013 4:32	4719.5	23.63	66.5	7.002	2.6	2.9	2.8
21/05/2013 22:11	2304.7	139.5	115.7	7.4441	2.7	2.2	3.1
30/05/2013 22:10	315.3	175.9	21.1	8.1554	2.5	2.6	2.8
26/06/2013 7:37	477.7	82.93	67.9	7.2543	2.7	2.7	3.3
30/06/2013 20:19	576.9	136.3	105.2	7.3505	2.7	2.7	3.0
18/07/2013 2:45	941.7	82.57	61.9	7.3557	2.7	2.6	3.5
28/07/2013 5:11	1191.4	182.4	113.8	7.5576	3.5	2.9	3.8
02/08/2013 11:15	9643.6	16.7	49.6	7.184	3.1	2.3	3.2
06/08/2013 14:54	210.2	149.2	133	7.7879	3.3	3.1	3.1
07/08/2013 11:38	6128.1	15.64	84.6	6.9	3.1	3.0	3.4
08/08/2013 0:00	930.2	91.43	75.2	7.1657	2.8	2.7	2.9
13/08/2013 1:40	496.1	127.8	48.6	7.8143	2.6	2.9	3.0
27/08/2013 11:59	222.6	115.5	90	7.2527	2.8	2.8	3.6
30/08/2013 22:26	270.5	171.5	19.2	8.129	2.6	2.8	2.7
09/09/2013 13:54	325.6	148.2	114.6	7.4614	2.5	2.5	2.7
13/09/2013 6:39	2177.5	14.75	71.4	6.9432	3.3	2.4	3.2
15/09/2013 6:17	205.6	118.5	95.1	7.2591	2.9	3.5	3.8
18/09/2013 5:41	5969.2	56.78	86.1	7.0271	2.6	2.8	3.1
27/09/2013 6:22	594.6	378.6	82.5	7.2591	3.2	3.1	3.3

11/10/2013 1:49	86181.2	117.2	68	7.4088	2.6	2.2	3.2
12/10/2013 2:10	813.2	114.6	56.5	7.6284	4.7	4.4	4.9
16/10/2013 11:18	2658.3	39.51	97	6.958	2.9	2.7	3.3
19/10/2013 10:47	6072.1	112.8	59.7	7.5572	3.5	3.5	3.8
03/11/2013 15:24	473.8	141.9	130.2	7.6834	2.6	2.2	2.9
06/11/2013 6:53	384.2	107.6	64.1	7.4484	3.2	2.7	3.4
07/11/2013 10:38	272	114.3	64.8	7.4612	2.6	2.4	3.1
10/11/2013 4:01	4627.2	42.39	89.6	6.9696	3.5	3.6	3.9
12/11/2013 1:43	249.2	131.9	16.3	7.8914	2.6	2.6	2.9
13/11/2013 8:38	463.1	87.53	5.7	7.4506	3.0	3.1	3.0
17/11/2013 9:19	1387.9	119.4	63.6	7.5056	3.2	3.3	3.7
23/11/2013 0:35	2354	107.7	89.2	7.2264	2.8	2.4	3.1
26/11/2013 16:20	20496.7	24.97	6.9	6.2	3.0	3.3	3.7
28/11/2013 0:00	527.9	99.17	76.8	7.1967	2.7	2.4	3.2
01/12/2013 15:57	829.4	115.3	78.6	7.259	2.6	2.5	3.0
09/12/2013 19:17	782.7	119.4	53.1	7.7156	2.5	2.4	2.6
16/12/2013 6:15	835.8	75.21	121.3	7.2712	2.8	2.7	3.4
20/12/2013 2:01	462.8	116.5	84.9	7.2595	2.7	2.3	3.2
23/12/2013 13:30	1978.9	64.64	84.6	7.0586	3.2	2.9	3.4
28/12/2013 9:17	14109	122.2	108.1	7.3314	2.5	2.1	2.7
02/01/2014 23:39	107.7	209.5	21.8	8.3665	3.0	3.0	3.2
03/01/2014 19:57	2221.8	82.51	100.4	7.1332	3.3	2.9	3.8
03/01/2014 20:43	111.7	107.4	7.7	7.7444	3.2	3.0	3.3
06/01/2014 22:24	661.1	244.2	112.1	7.7494	3.2	2.4	3.2
10/01/2014 4:14	163.9	225.6	27.9	8.4501	3.1	2.9	3.6
10/01/2014 4:48	178.3	193	46.2	8.1003	3.0	3.4	3.6
10/01/2014 13:34	349.8	137.4	18.7	7.9244	3.0	2.7	3.6
11/01/2014 21:00	197.7	143.9	121.5	7.5037	2.7	2.9	2.9
17/01/2014 20:15	466.3	89.16	6.4	7.4832	3.2	2.9	3.4
19/01/2014 7:40	4841.5	85.91	78.5	7.1436	3.0	2.7	3.1
19/01/2014 9:25	10279.9	52.2	2.8	6.5616	2.7	2.5	3.1
21/01/2014 9:43	215.5	158.3	46.1	7.9514	3.0	3.0	3.5
21/01/2014 14:53	219	112.3	121.3	7.4073	3.0	2.5	3.3
23/01/2014 10:33	254.4	119.2	75.6	7.2763	2.6	2.1	2.6
24/01/2014 3:07	173.7	163.7	3.3	8.0822	3.5	3.3	4.2

31/01/2014 16:36	1670.4	120.6	5	7.8236	3.3	2.4	3.3
31/01/2014 17:30	82.2	187.7	28	8.2052	3.3	2.4	3.4
31/01/2014 23:31	112.4	140.5	56.1	7.74	3.1	3.0	3.1
07/02/2014 3:43	1318.1	122.8	111.6	7.3612	3.3	3.5	3.9
15/02/2014 4:39	1381.8	110.2	70.2	7.3368	2.7	2.2	3.2
21/02/2014 6:11	1011.6	37.5	95	6.95	2.6	2.0	2.8
22/02/2014 19:11	638.6	75.1	100.3	7.1028	3.1	3.3	3.5
23/02/2014 14:03	13583.8	31.15	76.9	6.9246	3.7	3.8	4.4
28/02/2014 9:09	702.2	61.9	79.5	7.0476	3.2	2.8	3.6
01/03/2014 3:59	26985.1	11.46	5	6.2	3.0	2.8	3.5
01/03/2014 16:17	196	105.8	14	7.7348	3.0	3.0	3.0
03/03/2014 11:31	227.7	282.6	5	8.8782	2.7	2.9	2.8
04/03/2014 0:21	4924.2	15.36	57.9	7.1052	3.0	2.3	3.2
09/03/2014 12:27	886.9	65.6	4.1	6.9368	3.2	2.8	3.5
09/03/2014 19:11	1887.4	208.9	32.7	8.2952	3.9	3.5	3.7
17/03/2014 19:21	3395.7	86.46	76.5	7.1458	2.8	2.3	3.2
04/04/2014 19:58	5428	22.64	93.8	6.9	2.6	3.0	3.0
15/04/2014 2:45	1599	34.86	2.9	6.3183	3.1	2.7	3.2
15/04/2014 17:26	2320	132.1	101.8	7.3107	3.3	2.7	3.3
22/04/2014 4:25	249.7	117	91.5	7.2568	3.4	2.8	3.4
27/04/2014 4:24	850.6	23.96	92.8	6.9	3.0	3.0	3.5
01/05/2014 6:01	173.8	163	12	8.078	2.6	2.8	2.8
08/05/2014 4:29	101.2	169.6	15.8	8.1176	2.7	2.1	3.0
10/05/2014 23:04	5585.5	22.6	95	6.9	2.8	2.6	3.0
11/05/2014 23:21	52	191.9	9.8	8.2514	3.0	3.1	3.4
19/05/2014 0:14	331.7	69.96	5	7.0589	3.7	3.5	4.2
19/05/2014 4:55	405.2	71.75	84.1	7.087	3.7	3.0	3.9
25/05/2014 19:46	315	109.6	96.3	7.2302	3.6	3.4	3.9
03/07/2014 3:24	378.3	120.7	21.6	7.8242	3.0	2.7	3.1
28/07/2014 12:44	9490	47.02	5	6.4642	2.6	2.4	3.1
04/08/2014 2:23	647.8	98.4	95.7	7.1936	3.1	3.0	3.0
05/08/2014 21:23	5247	24.02	5.7	6.2	3.1	3.0	3.5
17/08/2014 14:45	1897.6	32.13	5.8	6.2856	3.7	2.8	3.7
17/08/2014 17:33	412.2	69.54	88.4	7.0782	3.0	2.9	3.6
18/08/2014 16:40	136.6	297.1	8.8	8.9797	3.2	3.3	3.3

25/08/2014 19:17	894.5	90.04	5	7.5008	3.1	3.1	3.2
28/08/2014 14:13	339.5	101	2	7.706	3.5	3.2	3.9
30/08/2014 0:26	112.7	495.4	71.5	8.9356	3.0	3.4	3.6
01/09/2014 11:34	359758.7	52.86	8.1	6.5801	2.8	3.4	3.6
01/09/2014 11:35	2155	101.7	4	7.7102	2.7	2.2	3.1
01/09/2014 11:49	7256.7	54.3	1.5	6.6204	2.8	2.7	3.1
07/09/2014 3:51	661.9	136.6	7.3	7.9196	3.8	3.5	4.2
16/09/2014 16:15	306.6	109.5	101.9	7.2437	3.0	2.3	3.1
18/09/2014 20:03	60.6	159.9	121.5	7.5517	3.1	2.8	3.4
19/09/2014 5:12	2294	123.1	80.5	7.2873	3.2	2.3	3.3
20/09/2014 11:03	1255.6	146.3	1.7	7.9778	2.9	2.6	2.8
21/09/2014 18:23	1182.5	122.5	98.8	7.2686	3.0	3.0	3.2
26/09/2014 20:12	2910	27.21	5	6.2265	3.0	3.1	3.7
02/10/2014 9:48	309509.9	24	8.6	6.2	2.9	2.2	3.2
02/10/2014 9:50	82161.3	22	13.7	6.2	3.5	2.8	3.8
02/10/2014 9:51	191998.5	21	6.8	6.2	2.8	2.4	3.3
02/10/2014 9:57	154.4	268.8	1.6	8.7816	3.2	3.0	3.3
02/10/2014 12:39	4104.8	22	11.5	6.2	3.0	2.4	3.3
03/10/2014 1:00	13588.3	25	3.9	6.2	3.4	3.1	3.5
09/10/2014 15:15	250.8	115	107.4	7.3042	3.0	3.7	4.2
10/10/2014 10:24	11153.5	46.2	10.2	6.4544	2.7	2.5	2.8
10/10/2014 20:37	37377.5	9	2	6.2	3.2	3.2	3.9
11/10/2014 21:54	38603.2	5.6	6.9	6.2	2.6	2.4	2.6
12/10/2014 2:52	438.9	263.3	36.1	8.5981	3.2	3.0	2.9
14/10/2014 12:13	2914.6	108.2	25.1	7.7491	3.0	3.3	3.2
18/10/2014 0:10	100.2	395.7	29.2	9.2681	2.5	2.6	2.8
26/10/2014 5:04	297.3	189.2	32	8.1852	2.6	2.3	2.6
30/10/2014 1:06	3249.3	102.1	28	7.7121	3.2	2.6	3.4
05/11/2014 6:35	165.2	134.9	14.4	7.9094	3.0	2.6	3.5
06/11/2014 21:20	933.3	85.71	17.9	7.4142	3.2	2.8	3.4
13/11/2014 8:54	987.5	91.04	25.4	7.5225	3.1	2.2	3.2
28/11/2014 19:53	819.9	103.9	26.2	7.723	3.2	2.2	3.4
06/12/2014 16:24	2340.6	114.3	123	7.4269	2.8	2.8	3.2
08/12/2014 1:37	8703.6	100	63.7	7.426	2.6	2.6	2.8
08/12/2014 13:15	6180.2	91.8	83.3	7.1672	3.0	2.5	2.6

12/12/2014 15:07	1295.8	83.75	57.8	7.4343	3.0	3.0	3.3
16/12/2014 21:01	2944.9	114.4	53.9	7.6796	3.1	2.3	3.1
17/12/2014 4:25	10677.7	36.06	26.5	6.3874	3.0	2.8	2.9
21/12/2014 19:54	162	103.1	11.8	7.7186	3.1	2.9	3.4
24/12/2014 2:19	330.6	117.2	117.7	7.3932	2.8	2.5	3.1
28/12/2014 5:43	276.1	269.1	22.2	8.7837	3.2	3.0	3.6
30/12/2014 0:28	1330.8	112.2	27.5	7.7708	2.5	1.9	2.5