

RELACIÓN DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO PARA LA ACELERACIÓN MÁXIMA (PGA) SOBRE EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO (MVB); ANÁLISIS POR TRAYECTORIA: GUERRERO-QUERÉTARO

Alejandro Clemente Chávez⁽¹⁾, G. Moisés Arroyo⁽¹⁾, Ramón Zúñiga⁽²⁾, Ángel Figueroa⁽²⁾, Miguel A. Pérez⁽¹⁾ y Carlos S. López⁽¹⁾

RESUMEN

Este artículo propone una metodología para determinar una relación de atenuación para estimar la aceleración máxima del suelo (PGA, por sus siglas en inglés) por medio del análisis de una trayectoria con base en regresiones lineales múltiples. A diferencia de estudios que determinan relaciones de atenuación usando varias trayectorias a la vez, este estudio presenta un enfoque en la delimitación del peligro sísmico que particulariza tanto la estratigrafía como la dirección a la fuente sísmica. Esta metodología fue aplicada a la trayectoria Guerrero-Querétaro a partir de registros sísmicos de estaciones que definen dicha trayectoria. Se analizaron seis sismos: el primero ocurrido en 1993 (Mw=6.6), dos en 2009 (Mw=5.2 y 5.6), y otros tres sismos de menor magnitud ocurridos en el 2010 (Mw=4.3, 4.7 y 4.9), conformando un total de 16 registros sísmicos, incluyendo las primeras señales sísmicas registradas en la ciudad de Querétaro. Estos sismos ocurrieron en la zona de subducción del Pacífico Mexicano, con fuente en el estado de Guerrero y todos ellos presentan características de la sismicidad interplaca. Respecto a estudios previos, los resultados muestran variaciones atribuidas a: 1) el análisis de una trayectoria y 2) la inclusión de registros en Querétaro (zona dentro del Cinturón Volcánico Mexicano, MVB por sus siglas en Inglés), los cuales presentan amplitudes que concuerdan con un decaimiento lento más no una amplificación del suelo.

Palabras Clave: atenuación sísmica, peligro sísmico.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology to determine an attenuation relation to estimate the Peak Ground Acceleration (PGA) by analyzing a trajectory based on multiple linear regressions. Unlike studies that determine attenuation relations using several trajectories at once, this study focuses on the delimitation of seismic risk that centers on both the ground stratigraphy and the seismic source direction. This methodology was applied to the Guerrero-Querétaro trajectory from records of seismic stations that define the trajectory. Six earthquakes were analyzed: the first one occurred in 1993 (Mw = 6.6), two in 2009 (Mw = 5.2 and 5.6) and three other smaller magnitude earthquakes

Artículo recibido el 11 de julio de 2011 y aprobado para su publicación el 13 de julio de 2012

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, UAQ, Centro Universitario, 76010 Querétaro, Qro. ing_acch@hotmail.com, marroyoc@uaq.mx, migperez@uaq.mx, hectorcslc1948@yahoo.com.mx

⁽²⁾ Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, 76230 Querétaro, Qro. ramon@geociencias.unam.mx, angfsoto@geociencias.unam.mx

occurred in 2010 ($M_w = 4.3, 4.7$ and 4.9). A total of 16 seismic records, including the first seismic signals recorded in Querétaro city, were considered. These earthquakes occurred in the Mexican Pacific subduction zone; their source was in the state of Guerrero and all of them presented interplate seismicity characteristics. With respect to previous research, the results show variations attributed to: 1) the analysis of only one trajectory and 2) the inclusion of seismic records in Querétaro (area within of the Mexican Volcanic Belt, MVB), which have amplitudes that are consistent with a slow fall but not an amplification of the ground.

Key Words: seismic attenuation, seismic hazard.

INTRODUCCIÓN

La atenuación del movimiento sísmico del suelo está en función de la relación *fuelle-traectoria-sitio* así como la distancia focal y la magnitud del evento, que asociados forman una base fundamental en la estimación de ecuaciones empíricas de atenuación. Estas ecuaciones son de gran utilidad para la predicción de amplitudes en la delimitación del peligro sísmico en un lugar determinado. La estimación del peligro sísmico en México ha sido preocupación de diversos investigadores, por ejemplo Esteva y Villaverde (1973) obtuvieron relaciones de atenuación para la aceleración y velocidad máxima del suelo con el complemento de datos de los Estados Unidos de América; Bufaliza (1984) obtuvo relaciones de atenuación con base en datos registrados sólo en México. Después de ocurrido el sismo del 19 de septiembre de 1985, surgieron diversos estudios basados en sismos costeros como el presentado por Singh *et al.* (1987) analizando sismos registrados en la estación CUIP (localizada en Ciudad Universitaria, en suelo firme de la ciudad de México) y dos años después Ordaz *et al.* (1989) proponen una relación de atenuación para campo lejano, respecto a la zona de subducción del Pacífico Mexicano, basada en la técnica de regresión lineal descrita por Joyner y Boore (1981).

En últimas fechas, dado que se ha enriquecido más la base de datos sísmicos para México, se han llegado a obtener nuevas expresiones de atenuación como las que presenta García (2006), quien continuando con el enfoque de, justifica sus relaciones de atenuación a partir de una clasificación de eventos inter e intra placa, presentando éstos una atenuación distinta. Ambos autores determinaron que la variación del coeficiente de expansión geométrica (g), además de su conocida relación con la distancia hipocentral R , está en función de la magnitud del evento.

Gracias a la operación de nuevas estaciones sísmicas, que permiten delimitar el peligro sísmico a estudios regionales y locales (*e.g.*, Bustillos, 2005), en este trabajo se estudiaron eventos de carácter interplaca con origen en la zona de subducción del Pacífico Mexicano, fuente principal de numerosos eventos que delimitan el riesgo sísmico del centro-sur de México (García, 2006). En particular se dedujo una relación de atenuación para estimar la aceleración máxima del suelo (PGA, por sus siglas en inglés) para la trayectoria de Guerrero hasta Querétaro. El comportamiento de la fuente y su propagación tierra adentro hasta los márgenes del Cinturón Volcánico Mexicano (MVB) y con especial atención dentro del Valle de la Ciudad de México, ha sido muy estudiado por la variabilidad amplificativa que presenta el suelo, como ocurrió por el sismo del 19 septiembre de 1985 (*e.g.*, Anderson *et al.*, 1986; Sánchez-Sesma *et al.*, 1988; Campillo *et al.*, 1989; Kawase y Aki, 1989; Singh *et al.*, 1989, 2000). Por otra parte los primeros en obtener parámetros que caracterizaron la atenuación en esta zona del Pacífico fueron: Rodríguez *et al.* (1983), Valdés *et al.* (1987), Singh *et al.* (1988), Castro *et al.* (1990), Rebollar *et al.* (1991), Ordaz y Singh (1992), Domínguez *et al.* (1997), Ottemöller *et al.* (2002) y estudios más recientes

como los de García *et al.* (2005) y García (2006), englobando sismicidad intra e interplaca, respectivamente.

Dada la incertidumbre que se tiene respecto a la señal sísmica observada al interior de los márgenes del MVB, en particular para el caso de Querétaro, este trabajo pretende formar la base para una sólida y justificada reglamentación ante el peligro sísmico que se tendría en la zona, motivo que sin lugar a duda es importante considerar dados los antecedentes que se conocen respecto a la presencia de efectos de amplificación en el MVB (*e.g.*, Ordaz y Singh, 1992; Shapiro *et al.*, 1997; Furumura y Singh, 2002; Iida y Kawase, 2004). Sin embargo, estudios recientes (*e.g.*, Cruz-Jiménez *et al.*, 2009; Ferrer-Toledo *et al.*, 2004) han mostrado que la señal sísmica procedente del Pacífico Mexicano presenta diferente comportamiento al entrar al MVB, esto acorde a las diferentes direcciones de las zonas sismogénicas de subducción del Pacífico Mexicano. Cruz-Jiménez *et al.* (2009), basándose en una modelación numérica sobre el comportamiento de la señal sísmica cuando ésta entra al MVB proveniente de la zona sismogénica de Guerrero, mostraron que no hay efectos de amplificación sino más bien un decaimiento lento de las amplitudes en frecuencias de alrededor de 0.5 Hz. Este tipo de discrepancias se deben quizás a las distintas características de terrenos que atraviesan las ondas sísmicas entre la zona del Pacífico y el MVB, con ello podría entenderse, bajo ciertas reservas, que quizás las discrepancias estén ligadas al tipo de trayectorias y emplazamientos analizados (García, 2006).

Por lo anterior, se decidió realizar un estudio que nos permita conocer el efecto de la señal observada en Querétaro proveniente de la fuente Guerrero, la más activa, de gran potencial sísmico (Singh *et al.*, 1981; Singh *et al.*, 1982; Nishenko y Singh, 1987a, 1987b) y de menor atenuación según se muestra en diversos estudios (*e.g.*, Castro *et al.*, 1994; Domínguez *et al.*, 1997; Nava *et al.*, 1999; Ottemöller *et al.*, 2002; García, 2006); además de intentar resolver la controversia del nivel de atenuación para trayectorias a lo largo de la costa y hacia el interior del continente. Existe mayor consenso en que la atenuación es menor en dirección hacia el interior del continente que hacia la costa (*e.g.*, Valdés *et al.*, 1987; Gutiérrez y Singh, 1988; Singh *et al.*, 1988; Cárdenas *et al.*, 1994, 1998; Ottemöller *et al.*, 2002; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003), pero por otro lado hay quienes no han encontrado diferencias de atenuación entre ambas trayectorias (*e.g.*, Ordaz y Singh, 1992; Novelo y Valdés, 2000). Un estudio más reciente de García *et al.* (2009) deja claro que efectivamente existe mayor atenuación en trayectorias a lo largo de la costa que en dirección al interior del continente debido a las distintas estructuras de la corteza y a efectos de guía de las ondas en ambas direcciones.

Estudios enfocados en la estimación del factor de calidad Q dentro y alrededor del MVB (*e.g.*, Ortega *et al.*, 2003; Ortega y Quintanar, 2005; Singh *et al.*, 2007) (principalmente con datos de sitios en la parte este del MVB) han coincidido en estimar un bajo valor de Q respecto al que se ha reportado para sitios fuera del MVB (sitios comprendidos entre el MVB y la costa del Pacífico Mexicano), lo que significa, en principio, que el suelo en sitios sobre roca dentro del MVB presenta mayor atenuación de la señal comparando con sitios fuera del MVB. Esto ocurre especialmente para frecuencias mayores a 1.0 Hz, mientras que para frecuencias menores a 1.0Hz ocurre una atenuación similar para sitios fuera y dentro del MVB. Esto es mostrado por Singh *et al.* (2007) en una comparación entre el espectro de aceleración predicho y el observado para un sismo de $M_w=7.4$ ocurrido en Oaxaca en 1995.

Con referencia a los estudios previos en el campo de atenuación, partimos de movimientos sísmicos registrados en diferentes estaciones a cargo del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED), así como de una estación nueva de la UNAM (denominada JUR1) ubicada en Juriquilla, Querétaro, con coordenadas 20.703° N y 100.447° W. Este trabajo permitió analizar la atenuación de la trayectoria Guerrero-Querétaro y obtener una relación de atenuación que permite predecir la PGA que se

presentaría en el municipio de Querétaro en suelo firme (roca), además de una predicción del PGA para eventos sísmicos de magnitudes mayores ($5.6 < M_w \leq 8$) de acuerdo con las tendencia de las curvas de atenuación con la propuesta metodológica presentada. Todo lo anterior con base en un análisis preliminar de las señales sísmicas observadas dentro del MVB correspondientes a sismos de magnitudes de entre 4.3 y 5.6Mw. Un primer punto de importancia de este estudio radica en la disponibilidad de datos sísmicos en Querétaro a distancias de 420km, aproximadamente, de Guerrero.

DATOS

La recopilación de datos sísmicos recientes ha permitido disponer de 16 registros correspondientes a 6 sismos. Sus respectivos epicentros se pueden ver en el mapa de la figura 1. Todos los sismos tienen epicentro en la zona de subducción de la costa de Guerrero, México. Las características más relevantes de los sismos seleccionados se muestran en la tabla 1. Para la selección de estos datos se tomó en cuenta la trayectoria con dirección a la zona de Querétaro, cruzando el MVB. Se consideraron las características de la fuente sísmica y formas de ecuaciones que describen las curvas de atenuación utilizadas por otros autores (*e.g.*, Joyner y Boore, 1981; Ordaz *et al.*, 1989; Atkinson y Boore, 2003; García, 2006) con la finalidad de comparar y complementar los resultados de este estudio.

Eventos y línea de registros en el análisis

La deducción de la expresión para la relación de atenuación se hizo en función del análisis de tres eventos principales: EP1, EP2 y EP3 (ver figura 1), de los cuales los dos primeros son eventos del año 2009 y el tercero es un sismo auxiliar, denominado así por no contar con su registro sísmico en la estación JUR1, dado que ocurrió en 1993, pero que fue tomado de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes emitido por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (BMDSF-SMIS, 1997); este evento se consideró dada la limitada disponibilidad de registros de sismos fuertes con la finalidad de conocer de manera más objetiva la tendencia de la trayectoria hacia Querétaro. A partir del registro de estos eventos considerados como sismos fuertes de tipo interplaca y con mecanismo focal inverso, se identificaron los registros sísmicos correspondientes en cada una de las estaciones ubicadas en la trayectoria Guerrero-Querétaro, gracias a la colaboración del CENAPRED (ver figura 1).

A los anteriores se añaden 3 eventos más (EP4, EP5 y EP6), que denominaremos eventos secundarios, todos de magnitud $M_w < 5.0$ y con registros observados sólo en estación JUR1, por tratarse de un sismógrafo de banda ancha (puesto que el resto de las estaciones del CENAPRED son acelerógrafos que están configurados para altas frecuencias en campo cercano, es difícil que registren eventos de magnitud $M_w < 5$). La figura 2 muestra la distribución de los datos considerados en este trabajo. Los eventos (EP4, EP5 y EP6) aportaron información adicional que nos permitió conocer la tendencia del PGA vs M_w en la estación JUR1 y estimar el punto faltante que se debió registrar para el evento EP3 de magnitud $M_w=6.6$. Lo anterior se planteó mediante la elección de un ajuste lineal para los puntos (ver figura 3) descartando la tendencia cuadrática también mostrada, decisión tomada luego de analizar lo siguiente.

Ambas tendencias (lineal y la cuadrática) ajustan muy bien a los datos observados disponibles, sin embargo sus tendencias hacia magnitudes mayores a $M_w \geq 6.0$ comienzan a mostrar marcadas diferencias en el nivel de PGA (ver figura 3). Por ejemplo, para un evento de $M_w=8.0$ en la tendencia lineal se tendría un $PGA=6.5$ Gal ($Gal \approx cm/s^2$) mientras que la tendencia cuadrática se tendría un PGA de 37.66 Gal. Así que teniendo en cuenta lo anterior y con base en estudios previos fue posible la elección de una tendencia

lineal, considerando tres aspectos: 1) el comportamiento de PGA vs Mw; 2) valores de PGA como referencia en la región norte del MVB (donde se localiza Querétaro); y 3) la ausencia de reportes cualitativos sobre daños en Querétaro debidos a algún sismo con fuente en la zona de subducción. El desarrollo de cada punto en el análisis es:

- 1) Considerar análogamente en este trabajo un ajuste del tipo lineal para el comportamiento de las variables PGA vs Mw como el propuesto en el trabajo de Atkinson y Boore (2003), el cual fue basado con mayores datos de eventos de gran magnitud respecto a los analizados en este estudio, además de ser también eventos del tipo de subducción.
- 2) Con valores de magnitud $M_w > 6$ la tendencia de los valores estimados con el ajuste lineal muestran mayor congruencia que la cuadrática, esto se mostró al comparar con valores estimados con base en las relaciones de atenuación (deducidas del análisis de múltiples trayectorias a la vez) reportadas por Ordaz *et al.* (1989) y García (2006); de los cuales el primero rige actualmente el peligro sísmico en la zona del MVB (por ejemplo., MDOC-CFE, 2008). En tabla 2 se muestra un ejemplo basado en información puntual ($M_w=8$, $H=17\text{km}$ y $R=416.22\text{km}$); esta comparación justificó también, en principio, parte de la viabilidad del presente estudio al percatarse de una sobre estimación del PGA observada en Querétaro para bajas magnitudes $M_w \leq 5.2$.

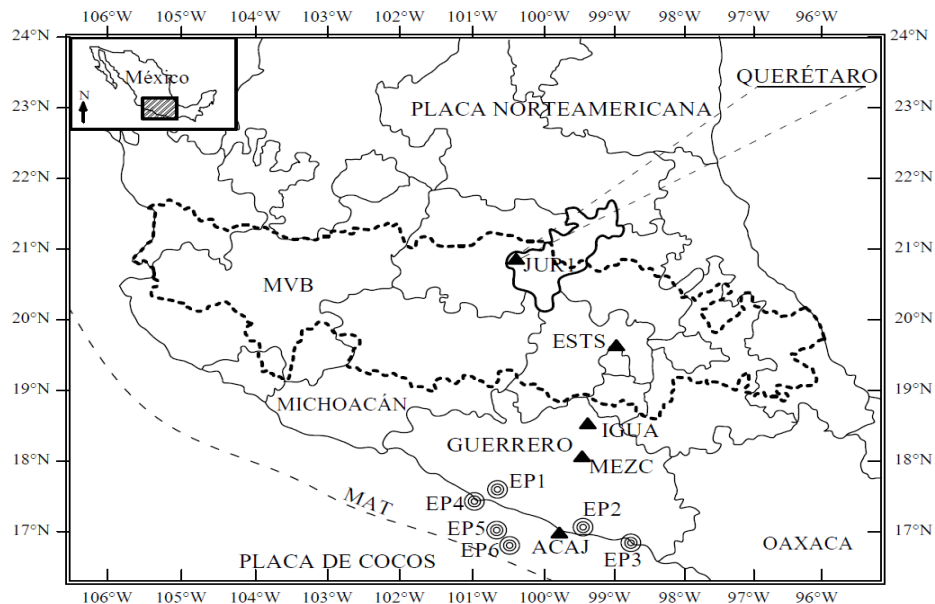


Figura 1. Zona de estudio, trayectoria Guerrero-Querétaro. Epicentros (círculos) y las estaciones (triángulos). MVB: Cinturón Volcánico Mexicano (línea intermitente). MAT: Fosa Centroamericana.

Lo anterior es congruente con estudios enfocados al MVB, recientemente realizados por Ortega *et al.* (2003), Ortega y Quintanar (2005) y Singh *et al.* (2007) al reportar valores bajos de Q , lo cual implica una mayor atenuación respecto a zonas tectónicamente activas. Singh *et al.* (2007) estimaron un bajo Q , (incluso menor a lo reportado en los dos estudios previos mencionados) en una sección norte-sur del MVB (utilizando dos estaciones DHIG y PLIG) pasando por el Valle de la Ciudad de México. Singh *et al.* (2007) reportaron un valor de $Q=98f^{0.72}$ el cual es menor respecto al que se tiene en la zona comprendida entre el MVB y la costa del Pacífico Mexicano, $Q=273f^{0.66}$, reportado por Ordaz y Singh

(1992). Singh *et al.* (2007) se basaron en registros de sismicidad tipo interplaca del Pacífico Mexicano, como los analizados en este trabajo. Con base en este valor de Q , estos autores estimaron un espectro de aceleración particular para la región norte del MVB (en el sitio de estación DHIG, en Hidalgo, con distancia hipocentral R de 424km) el cual fue comparado con el observado, mostrando gran concordancia. La comparación se basó en el sismo de Copala de 1995, con $M_w=7.4$, ocurrido en Oaxaca, el cual mostró un valor máximo de aceleración espectral observado de alrededor de 4.5Gal en la frecuencia de 0.5Hz. Ahora bien, si consideramos: la ubicación de JUR1 en Querétaro (ubicada también en la parte norte del MVB), la distancia $R_{prom}=416.22\text{km}$ entre Guerrero y Querétaro (R empleada en la figura 3) y que las amplitudes de las PGA de los sismos analizados en este trabajo están en el rango de 0.5 a 2Hz; el comportamiento en las amplitudes de la PGA esperadas para eventos de gran magnitud ($M\approx 8.0$) podrían ser similares para Querétaro respecto a las observadas en Hidalgo, mostrando así una mayor congruencia con la tendencia lineal que estima un valor de 6.5 Gal como se muestra en figura 3.

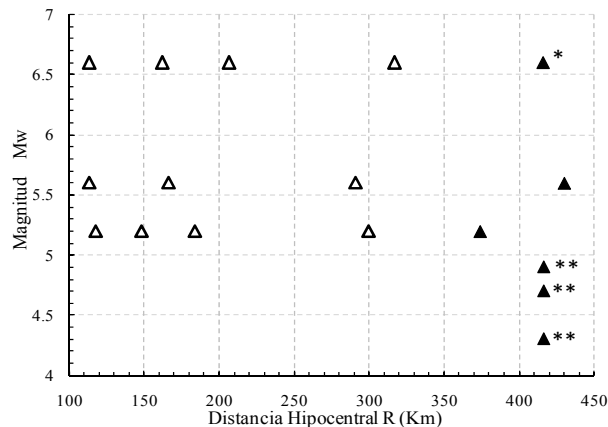


Figura 2. Distribución de base de datos. Registros de aceleración (triángulos vacíos). Registros de velocidad (triángulos sólidos). Predicción del evento EP3 basada en datos de JUR1 (sólido y un asterisco). Datos existentes sólo en JUR1 (sólidos y dos asteriscos).

Tabla 1. Características principales de los eventos interplaca de México utilizados en este trabajo.

No. Ep	Fecha	Lat ° N	Long. ° W	H km	Mw	Mec. Falla	No. Regs.	Obs.
1	27/03/2009	17.35	100.82	30	5.2	Inversa	5	1
2	27/04/2009	16.90	99.58	7	5.6	Inversa	4	1
3	24/10/1993	16.65	98.87	26	6.6	Inversa	4	2 y 4
4	19/03/2010	17.22	100.97	15	4.9	Inversa	1	3
5	06/01/2010	17.01	100.86	30	4.7	Inversa	1	1
6	31/01/2010	16.65	100.56	5	4.3	Inversa	1	3
Total=							16	

Observaciones:

- 1 La magnitud y el mecanismo de falla fueron tomadas de la página del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2010) (<http://laxdoru.igeofcu.unam.mx/~cmt/nouveau/contact.php>).
- 2 Datos tomados de BMDSF-SMIS (1997), con observaciones en Memoria Doctoral de García (2006).
- 3 La magnitud fue estimada con base en una regresión de M_w vs M_d , con datos reportados por SSN (2010) (<http://laxdoru.igeofcu.unam.mx/~cmt/nouveau/contact.php>, <http://www.ssn.unam.mx>).
- 4 Este es el único registro auxiliar utilizado en este trabajo, el resto son eventos recientes del 2009 y 2010.

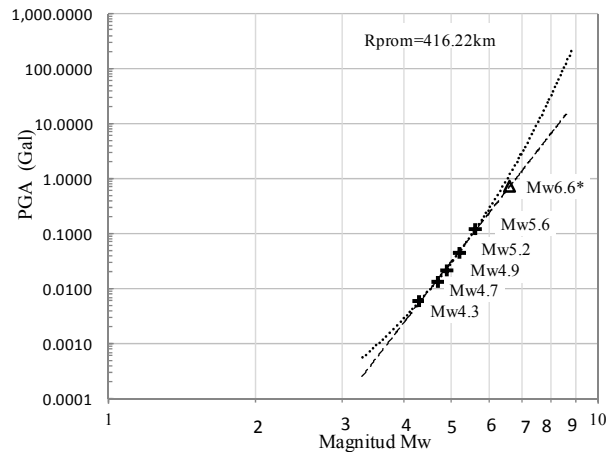


Figura 3. Tendencia PGA vs Mw en Querétaro (JUR1). PGA observado (cruces), estimación PGA para Mw=6.6 (triángulo). Tendencia cuadrática (línea punteada) y tendencia lineal (línea discontinua).

Tabla 2. Comparación puntual de la PGA estimada de la tendencia lineal y cuadrática con respecto a las estimaciones de relaciones de atenuación previas.

Autores de la relación de atenuación	Datos			Estimación PGA (Gal)	PGA -S (Gal)	PGA +S (Gal)
	Rprom (Gro-Qro)	Mw	H(km)			
Ordaz et al. (1989)	416.22	8.0	-	1.79	1.00	3.17
García (2006)	416.22	8.0	17	2.69	1.26	5.75
Este trabajo: Tendencia lineal	416.22	8.0	-	6.50	-	-
Este trabajo: Tendencia cuadrática	416.22	8.0	-	37.66	-	-

-S,+S= indican más y menos una desviación estándar reportada para cada relación de atenuación

3) Cualitativamente la incongruencia del nivel de la PGA obtenida con la tendencia cuadrática presentada en la figura 3, radica en que para un evento de Mw=8.0, tendríamos 37.66 Gal en Querétaro (ver tabla 2), aspecto que asociado a la escala de Mercalli modificada implicaría que una aceleración del orden de 37.66 Gal es equivalente a la intensidad V (lo cual indica “sentido por todo el mundo”), lo que resulta una noticia que difícilmente pasaría desapercibida sin ser documentada en medios de comunicación impresos locales. Situación que debió presentarse en el evento de Michoacán de 1985 con Mw=8.0, este análisis sugiere pensar que ocurrieron aceleraciones muy inferiores a 37.66 Gal.

Con la exposición de estos tres puntos, resulta claro notar mayor congruencia con el ajuste lineal que con la cuadrática, es decir, existe mayor credibilidad que un evento de Mw=8.0 presente una PGA de alrededor de 6.5 Gal que una PGA de 37.66 Gal (ver figura 3). Resultando este último valor, ser muy alto para el sitio en JUR1, en comparación a los valores de aceleración de referencia reportados en estudios previos mencionados (ver tabla 2).

PROCESAMIENTO DE DATOS

La aceleración máxima correspondiente a cada componente horizontal (A_N es la aceleración máxima en la componente NS y A_E es la aceleración máxima en la componente EW) se obtuvo directamente de los

acelerogramas de alta calidad proporcionados por el CENAPRED. La calidad de los datos fue verificada al graficarse la A_N y A_E de cada registro de las estaciones en la trayectoria Guerrero-Querétaro con una previa selección de las estaciones en campo libre, situadas en roca y verificando que no presentaran efectos de amplificación. Los sismogramas en la estación JUR1 se deconvolucionaron y diferenciaron para obtener la A_N y A_E de los registros, todo ello bajo un largo periodo de pruebas de calibración en la estación JUR1 (Figueroa *et al.*, 2010). Solamente para el evento de $M_w=4.3$ fue necesario aplicar un filtro pasa altas, con el objeto de identificar fácilmente el valor A_N y A_E .

Posterior a este proceso, se calcularon los promedios cuadráticos de la aceleración máxima de las dos componentes horizontales de cada registro con base en la ecuación 1, que representan la PGA en este trabajo. Las distancias hipocentrales (R) se estimaron directamente con las coordenadas geográficas (utilizando principios básicos de geometría) a partir de la profundidad (H) para cada evento. Es importante mencionar que debido a la calidad de datos en la estación JUR1 (sismógrafo de banda ancha), el procesamiento de los registros requirió un menor tratamiento (aplicación de correcciones de línea base y filtros), en comparación a estudios pasados con datos analógicos que incluían numerosos filtros y correcciones, los cuales afectan de alguna forma los resultados (García, 2001).

$$PGA = \sqrt{\frac{A_N^2 + A_E^2}{2}} \quad (1)$$

METODOLOGÍA

Se emplearon los principios básicos del método de regresiones de efectos aleatorios en las formas de las relaciones de atenuación desarrolladas por Joyner y Boore (1981), Atkinson y Boore (2003) y García (2006). En estos trabajos se concluyó que los mejores resultados de la regresión lineal múltiple son los obtenidos a través del análisis de trayectorias particulares (trayectorias definidas como: las líneas que se forman a partir de la fuente sísmica a un sitio de interés, a través de la ubicación de estaciones sísmicas que están dentro de la dirección del sitio de interés) y con datos observados del sitio de interés. Lo anterior, como contraparte del manejo de trayectorias múltiples, tratando de cubrir varios sitios con distintas direcciones y al uso de datos de otras regiones, esto último bajo el sustento de contar con zonas tectónicamente similares.

Atkinson y Boore (2003) agruparon los sismos como eventos inter e intra placa de algunas zonas de subducción del mundo, a partir de los cuales se encontraron diferencias en los resultados para la predicción de la PGA, tales como: diferentes predicciones de amplitudes para dos zonas con el mismo tipo de evento, es decir la misma magnitud y distancia, hecho que fue justificado por las diferencias de las estratigrafías de las diversas zonas (EUA, México, Japón y zonas de América Central). Así también el mismo estudio de Atkinson y Boore (2003) dejó claro que el coeficiente de expansión geométrica (g) varía en función de la magnitud, como se observa en su propuesta de la forma general en la ecuación 2 para suelo firme.

$$\log PGA = f(M_w) + c_3 H + c_4 R - g \log R \quad (2)$$

$$g = 10^{(c_5 + c_6 M_w)} \quad (3)$$

$$f(Mw) = c_1 + c_2 Mw \quad (4)$$

El primer término de la ecuación 2 es función de la magnitud Mw expresada en un polinomio de primer orden, establecido en estudios previos por Joyner y Boore (1981) y que se muestra en la ecuación 4, así como la variable g definida por la ecuación 3.

Estas expresiones son resueltas mediante regresiones lineales múltiples, donde la solución consiste en determinar los coeficientes c_i por medio de diversos métodos, entre los que destaca el conocido Método de dos pasos ó el Método de Joyner y Boore (1981) mejorado por Atkinson y Boore (2003) quienes se centraron en resolver las ecuaciones 3 y 4, para finalmente obtener la solución de la ecuación 2.

Dichos antecedentes dieron la pauta en este trabajo para aplicar una regresión lineal múltiple, donde los datos de partida son en específico para el análisis de la trayectoria Guerrero-Querétaro. Al efectuar una regresión con la forma de la ecuación 5 para cada magnitud Mw, fue posible obtener los siguientes coeficientes: término de ajuste (a'), coeficiente de anelasticidad (c'_4) y el coeficiente de expansión geométrica (g'); valores mostrados más adelante. A esta etapa se le denominó primera etapa.

$$\log PGA = a' + c'_4 R + g' \log R \quad (5)$$

La segunda etapa consistió en efectuar regresiones de los coeficientes variables resultantes (a' , c'_4 y g'), como función de la magnitud Mw y la profundidad H, de esta manera se obtuvieron tres coeficientes: a , c_4 y g , definidos con la forma de una ecuación polinomial de primer orden y que son mostradas en las ecuaciones 6 a 8. De esta forma se determinan los coeficientes que definen la forma general de la relación de atenuación, mostrada en la ecuación 9.

$$a(Mw, H) = c_1 + c_2 Mw + c_3 H \quad (6)$$

$$c_4(Mw, H) = c'_1 + c'_2 Mw + c'_3 H \quad (7)$$

$$g(Mw, H) = c''_1 + c''_2 Mw + c''_3 H \quad (8)$$

$$\log PGA = a(Mw, H) + c_4(Mw, H) R + g(Mw, H) \log R \quad (9)$$

En las relaciones anteriores, PGA es el promedio cuadrático de la aceleración máxima de las dos componentes horizontales de cada registro de aceleración del suelo (en $\text{cm/s}^2 \approx \text{Gal}$), Mw es la magnitud de momento sísmico (Kanamori, 1977), R es la distancia hipocentral (en km), H representa la profundidad focal (en km); a' , a , c_i , c'_i , c''_i , g' y g , son los coeficientes de la relación de atenuación.

Por otra parte, se estimó la desviación estándar máxima resultante (σ_R) de los residuos (ecuación 10), en escala logarítmica de base 10, como función de las desviaciones estándar intra (σ_r) e inter-evento (σ_e) respectivamente (Atkinson y Boore, 2003).

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2} \quad (10)$$

La metodología propuesta en este trabajo difiere en varios aspectos de los propuestos por Atkinson y Boore (2003) y García (2006), dichos aspectos son los siguientes:

1. En este trabajo se parte del análisis de una trayectoria en específico para tres eventos, lo que implica una menor dispersión de residuos (ecuación 10), en lugar de combinar las dos direcciones norte-sur y este-oeste (terreno en dirección a la costa), puesto que en otros estudios este segundo análisis ha mostrado diferencias, en el nivel de atenuación, para cada trayectoria (*e.g.*, Valdés *et al.*, 1987; Gutiérrez y Singh, 1988; Singh *et al.*, 1988; Cárdenas *et al.*, 1994, 1998; Ottemöller *et al.*, 2002; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003; García *et al.*, 2009).
2. Se parte de las tres regresiones iniciales correspondientes a cada evento en la trayectoria Guerrero-Querétaro, mientras que para los otros estudios de comparación estas regresiones fueron efectuadas englobando diferentes trayectorias según las estaciones de estudio, lo que resultó en una expresión final para la relación de atenuación con un valor constante para el coeficiente de expansión anelástica (c_4), situación que contribuye a guardar cierto paralelismo entre curvas de atenuación de diferentes magnitudes (*e.g.*, Ordaz *et al.*, 1989; García, 2006).
3. En la segunda etapa, se propuso una regresión múltiple con tendencia lineal logarítmica para los coeficientes a , c_4 y g en función de la magnitud M_w y profundidad H , sustentada en la tendencia de la señal sísmica mostrada en registros de la estación JUR1 como se muestra en la figura 3.
4. Finalmente se propone una relación de atenuación que nos permitió predecir valores de PGA en Querétaro para sismos con magnitudes mayores ($M_w > 5.6$) aún cuando nuestra base de datos, para la estación JUR1, no tiene registros de magnitudes superiores a este valor que respalde nuestra predicción, como ocurre en estudios previos (*e.g.*, Ordaz *et al.*, 1989; García, 2006), es decir, los valores que definen las curvas de magnitudes mayores son producto de la tendencia determinada por medio del análisis de variabilidad de los coeficientes en las tres curvas de atenuación para las magnitudes inferiores.

ANÁLISIS DE COEFICIENTES Y EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE ATENUACIÓN

1. Se efectuaron las tres primeras regresiones (primer etapa), para los tres eventos en la trayectoria Guerrero-Querétaro, con muy buenos índices de correlación y determinación (ver figura 4), obteniendo las tres siguientes ecuaciones:

$$\log PGA = 1.26 - 0.00653 R + 0.0098 \log R \quad \text{para } M_w=5.2 \text{ y } H=30\text{km} \quad (11)$$

$$\log PGA = 1.53 - 0.00561 R - 0.0239 \log R \quad \text{para } M_w=5.6 \text{ y } H=7\text{km} \quad (12)$$

$$\log PGA = 1.74 - 0.0047 R - 0.005 \log R \quad \text{para } M_w=6.6 \text{ y } H=26\text{km} \quad (13)$$

2. Posteriormente, en una segunda etapa se obtuvieron los coeficientes mostrados en la tabla 3, donde es posible reconocer el nivel de dependencia con la magnitud M_w y profundidad H . Estos coeficientes determinan la forma general de la relación de atenuación (ecuación 9) y definen la relación de atenuación para la trayectoria Guerrero-Querétaro (ecuación 14).

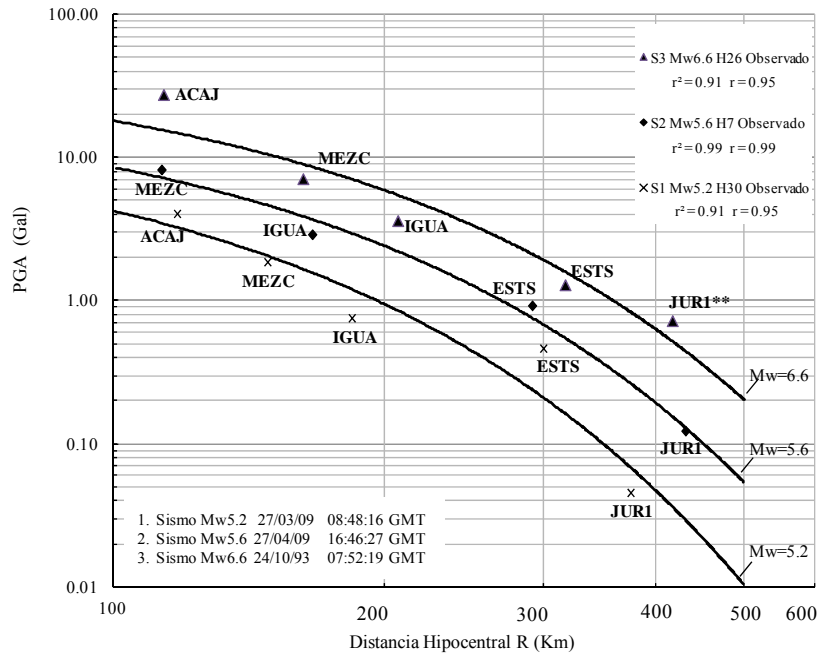


Figura 4. Curvas de regresión de los tres eventos principales en la trayectoria Guerrero-Querétaro. Las abreviaturas son las claves de las estaciones y los símbolos son cada uno de los datos de ajuste.

Tabla 3. Coeficientes de la relación de atenuación para estimar la PGA en la trayectoria Guerrero-Querétaro.

Predicción	a	c_4	g	σ_R	σ_e	σ_r
PGA	$-0.250 + 0.325 M_w - 0.00608 H$	$-0.0125 + 0.00126 M_w - 0.000018 H$	$0.00429 - 0.00672 M_w + 0.00135 H$	0.21	0.14	0.16

Relación atenuación para trayectoria Guerrero-Querétaro:

$$\log PGA = (-0.25 + 0.325 M_w - 0.00608 H) + (-0.0125 + 0.00126 M_w - 0.000018 H) R + (0.00429 - 0.00672 M_w + 0.00135 H) \log R \quad (14)$$

La tendencia de los coeficientes a , c_4 y g en la ecuación 14, se puede entender con mayor facilidad bajo el planteamiento siguiente:

1. Tendencia de cada uno de los coeficientes a , c_4 y g en función de M_w y de H para los tres eventos principales.
2. Tendencia de cada uno de los coeficientes a , c_4 y g en función de la PGA.

Del punto uno, se determinó la tendencia y el nivel de significancia para cada coeficiente, como función de la magnitud M_w y la profundidad H (figura 5).

El coeficiente de ajuste (a), que representa el término de mayor influencia en la relación de atenuación como lo presentan también Joyner y Boore (1981), varía principalmente en función de la variable de magnitud ($r^2 = 0.90$) guardando una muy fuerte correlación lineal creciente ($r = 0.95$) (ver figura 5a), no así en el caso del mismo coeficiente con la profundidad ($r^2 = 0.055$). Además, el coeficiente a guarda una correlación decreciente respecto a la profundidad ($r = -0.23$) (ver figura 5b).

El coeficiente de anelasticidad c_4 y la magnitud M_w (figura 5c) guardan una muy fuerte correlación lineal creciente ($r = 0.97$); la relación de ésta misma variable c_4 con la profundidad (figura 5d) es decreciente ($r = -0.16$).

La relación entre el coeficiente de expansión geométrica g y la magnitud M_w (figura 5c) es decreciente ($r = -0.21$) como se ha documentado en otros estudios (*e.g.*, Atkinson y Boore, 2003 y García, 2006). En cuanto a la relación de g con la profundidad se determinó una muy fuerte correlación lineal creciente ($r = 0.96$), como se muestra en la figura 5d.

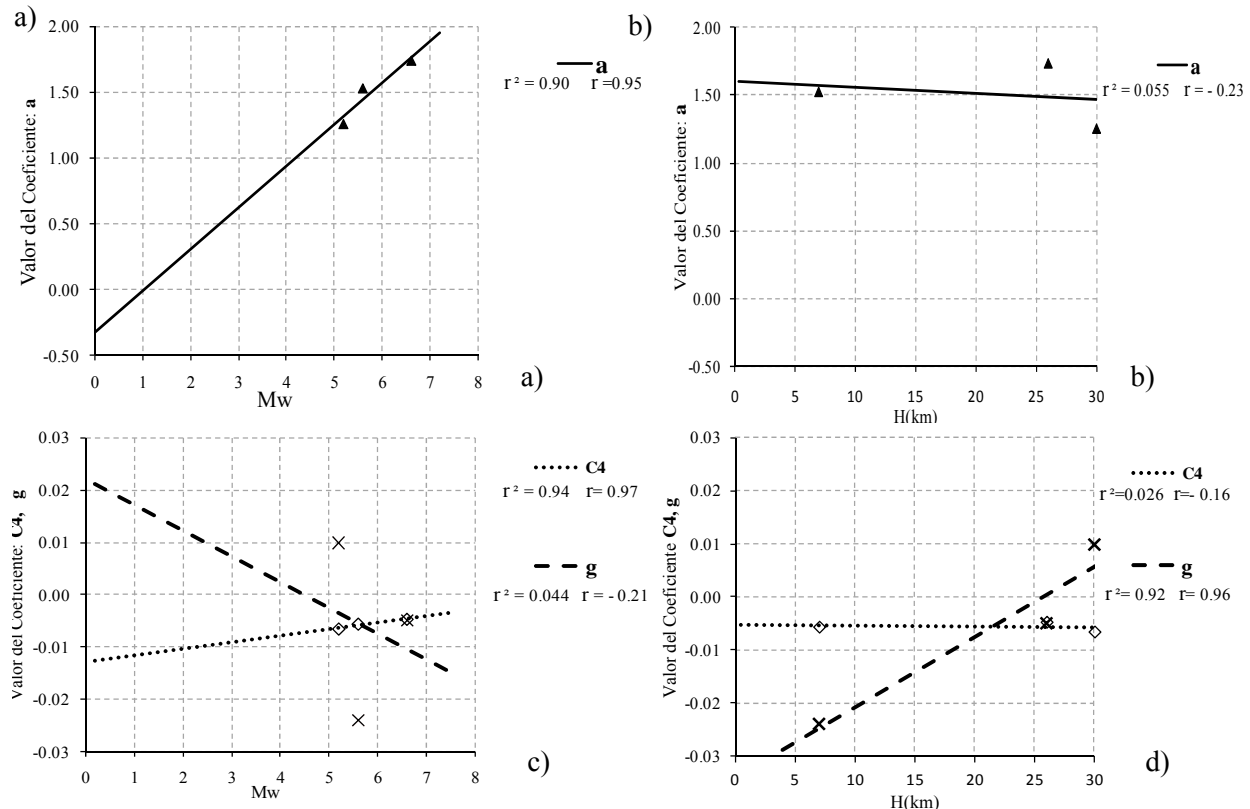


Figura 5. Tendencia lineal de los coeficientes a , c_4 y g , contra la magnitud M_w y la profundidad H , en la primera etapa de la metodología.

El significado físico que representa el fenómeno de atenuación con relación a los coeficientes a y g , indican que a mayor profundidad H el coeficiente de ajuste disminuye y el coeficiente de expansión geométrica crece, lo que implica menor valor del PGA en eventos interplaca a grandes distancias. Así mismo se observa que los coeficientes a y c_4 están definidos principalmente por el valor de la magnitud, de forma proporcional directa y con muy poca influencia de la profundidad, por su parte el comportamiento del coeficiente g se ve mayormente influenciado por la magnitud, como se ha reportado en trabajos recientes (por ejemplo, García, 2006; Atkinson y Boore, 2003).

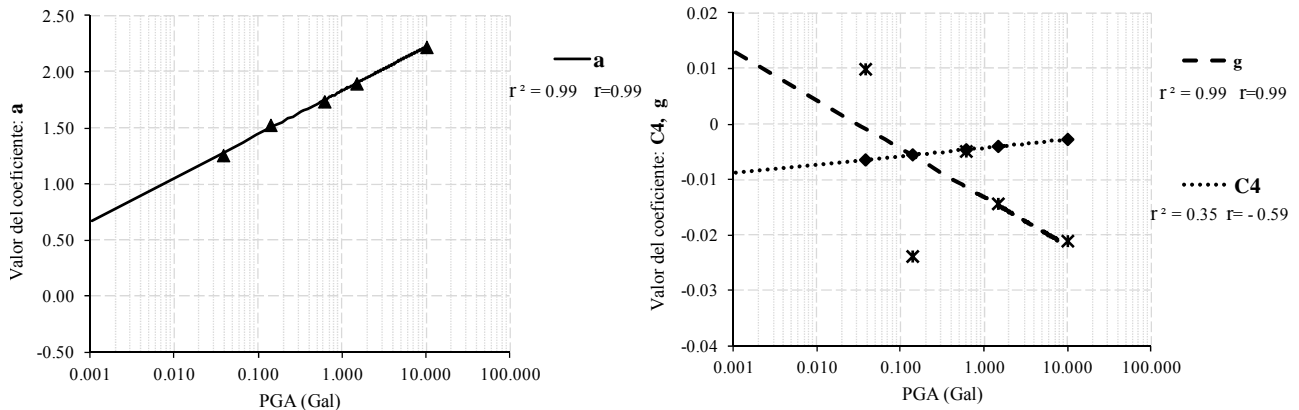


Figura 6. Tendencia lineal de los coeficientes a , c_4 y g , con la PGA de la relación de atenuación (ecuación 14), propuesta en este trabajo, evaluada para las magnitudes $5.2 \leq M_w \leq 8.0$ y la distancia $R_{\text{prom QRO}} = 416.22$ km

Respecto al punto dos, correspondiente a la tendencia de los coeficientes en función de la PGA (figura 6), se realizó un análisis de forma análoga al punto anterior, identificando la dependencia del valor de la PGA, considerando una distancia R fija, producida por un sismo de magnitud M_w originado a cierta profundidad H y se define en orden decreciente el nivel de significancia de aporte a cada uno de los coeficientes de los términos involucrados en la relación de atenuación (a , c_4 y g). Los dos primeros coeficientes dependen principalmente de la magnitud, como se aprecia en las figuras 5a y 5c, lo que implica a su vez un mayor valor de la PGA como se muestra la tendencia en la figura 6a y 6b. En cuanto al tercer término g , se muestra una disminución con el aumento de la magnitud (ver figura 5c) lo que implica también la disminución consecuente con el aumento del PGA, tal y como se observa en la figura 6b. En conclusión, los coeficientes a , c_4 y g presentan una tendencia congruente al fenómeno de atenuación.

Respecto a la relación de atenuación propuesta (ecuación 14), se realizó la evaluación de la misma, obteniendo los residuos, que usualmente son medidos en escala logarítmica de base 10. La interpretación de estos valores nos indican qué tan subestimada o sobrestimada se halla la relación de atenuación planteada respecto a los valores observados, por ejemplo un residuo de -0.2 equivale a una sobrestimación con un factor de 1.58 respecto al valor observado. Comúnmente estos valores suelen estar entre 0.27 y 0.38 (factor de 1.86 y 2.4, respectivamente) (García, 2006). Los valores de los residuos en este trabajo oscila en un rango de 0.33 y -0.21 , con una media de -0.025 y una desviación estándar de 0.21 (equivalente a un factor de sobrestimación de 1.62), como se observa en la figura 7.

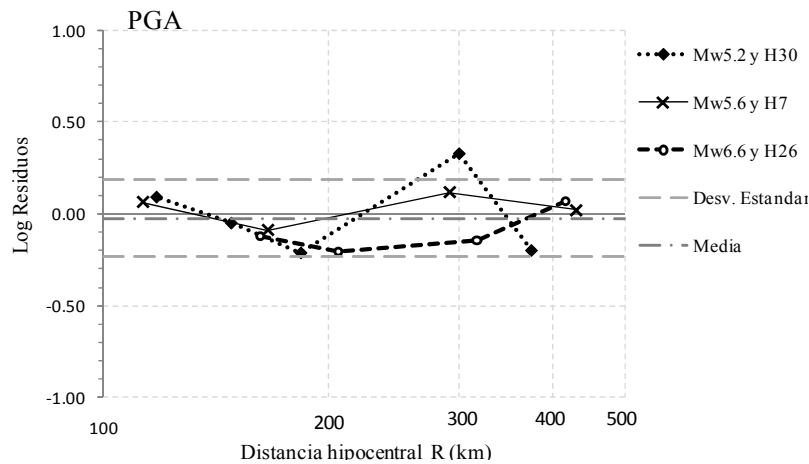


Figura 7. Residuos logarítmicos vs distancia hipocentral R, para la componente horizontal, para cada evento.

La variabilidad de la predicción de la PGA en cada relación de atenuación de comparación (Ordaz *et al.*, 1989 y García, 2006) y que se asocia a la desviación estándar de los residuos, resulta de difícil interpretación y comparación. Por lo anterior, se decidió graficar un ancho de banda (franja) para los tres eventos principales (Mw=5.2, 5.6 y 6.6) definida por la desviación estándar S de cada relación de atenuación como se muestra en la figura 8, donde cada franja representa la variabilidad de la PGA correspondiente para cada curva de atenuación y al mismo tiempo se hizo la inclusión de datos observados con el objetivo de analizar la dispersión para cada relación de atenuación. De este análisis identificamos los siguientes puntos:

1. Que el ancho de banda de la relación de atenuación de Ordaz *et al.* (1989) en la figura 8a, correspondiente al evento de magnitud Mw=5.2 sobrestima más allá del rango de su desviación estándar puesto que ningún punto observado cae dentro de tal franja. Por otro lado, en el ancho de banda de la relación de atenuación de García (2006) se incluye la mayoría de los puntos observados, excepto el registrado a mayor distancia con ubicación en la estación JUR1.
2. Para los datos observados del evento con magnitud Mw=5.6 mostrada en la figura 8b, los anchos de banda de las tres relaciones de atenuación se satisfacen en su mayoría, excepto por el punto en JUR1, que es sobrestimada por la relación de atenuación de Ordaz *et al.* (1989).
3. Por último, en la figura 8c, se muestra que el evento observado con magnitud Mw=6.6, es el que mejor satisface las dos relaciones de atenuación en comparación. Además, se observa que el punto inferido en JUR1 (con un valor de 0.72 Gal para la PGA) muestra congruencia por hallarse dentro de las dos bandas de desviación estándar de comparación.

Dado el ejercicio anterior, en la figura 9 se propuso anteponer gráficamente el ancho implícito para cada una de las relaciones de atenuación en comparación con la presentada en este trabajo, considerando las magnitudes más representativas ante el peligro sísmico así como la inclusión de todos los datos observados y empleados en este estudio. Así mismo se enfatizó en los valores de la PGA a distancias cercanas a la estación JUR1, (rectángulo de línea discontinua, figura 9) debido a que las relaciones de atenuación en comparación no son respaldadas con datos observados a éstas distancias y que muy probablemente sean en gran parte los responsables de las diferencias de las curvas de atenuación además

del análisis por trayectoria y del tipo de metodología propuesta. A partir de este análisis es posible reconocer lo siguiente:

1. Que los anchos de banda en las dos relaciones de atenuación de comparación mostrados en la figura 9a y 9b muestran una marcada intersección, de donde es posible reconocer que los puntos ubicados en esta zona se encuentran en una franja de traslape, por lo que podrían corresponder a un evento con una unidad de magnitud mayor o menor (e.g., en la figura 9b, para la relación de atenuación de García (2006) el punto de $M_w=5.6$ en JUR1 puede asociarse tanto a una magnitud de $M_w=5.0$ como de $M_w=6.0$).
2. La incertidumbre se puede acotar mucho mejor si se analiza la atenuación por trayectorias particulares, como se muestra en la figura 9c con un menor ancho en las bandas estimadas en este trabajo.

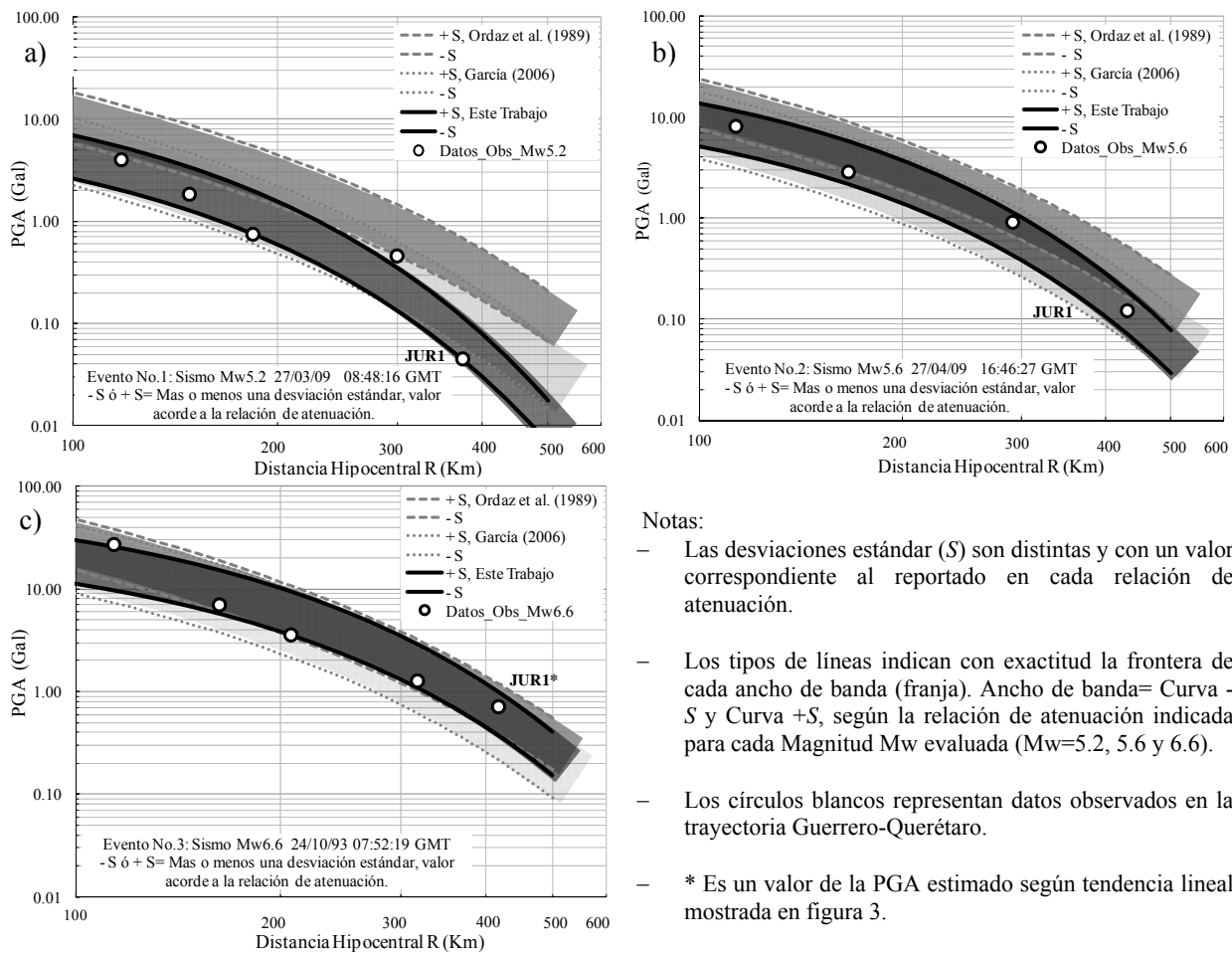


Figura 8. Análisis de curvas de atenuación de las tres relaciones de atenuación indicadas, expuestas con bandas definidas por su desviación estándar ($\pm S$) contra datos observados en las magnitudes $M_w=5.2, 5.6$ y 6.6

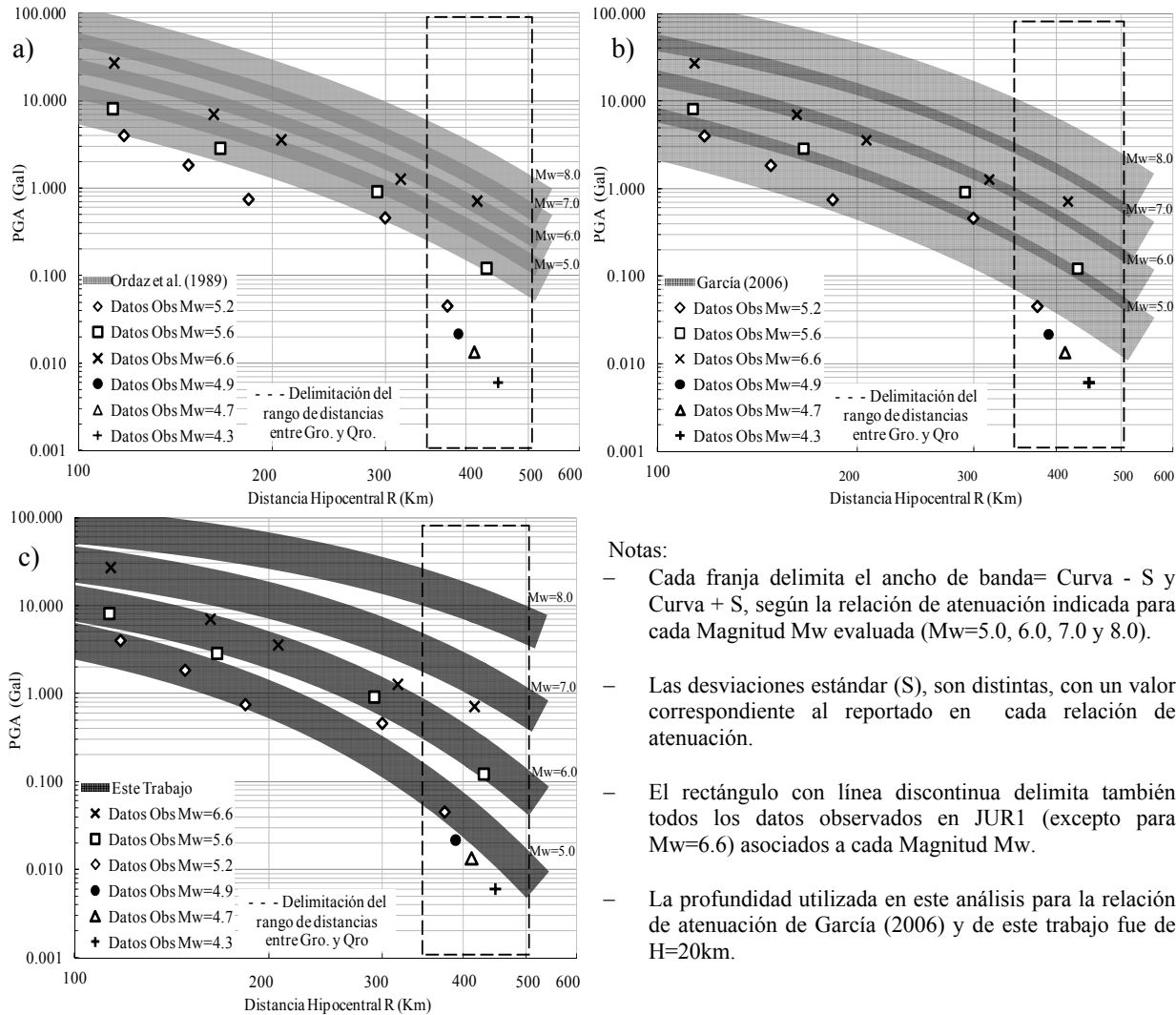


Figura 9. Análisis de curvas de las relaciones de atenuación indicadas, expuestos con una banda definida por su desviación estándar para las magnitudes Mw=5.0 a 8.0 con la inclusión de datos observados.

COMPARACIÓN CON: LAS RELACIONES DE ATENUACIÓN PREVIAS PARA LA PGA EN MÉXICO Y EL COMPORTAMIENTO DE ATENUACIÓN DENTRO DEL MVB

La relación de atenuación propuesta en este trabajo fue comparada con dos de las relaciones de atenuación que han sido de las más sobresalientes en la delimitación del peligro sísmico en México: Ordaz *et al.* (1989) y García (2006). El primero de ellos se basó en aproximadamente un centenar de registros de sismos interplaca ($5.0 \leq M \leq 8.1$, aprox.) de campo lejano ($R \leq 350\text{km}$) registrados en su mayoría por la red de Guerrero; el segundo autor utilizó 418 registros de 40 eventos interplaca ($5.0 \leq M_w \leq 8.0$), tanto de campo lejano como cercano ($16 \text{ km} \leq R \leq 400\text{km}$) de la zona de subducción entre los estados de Colima y Oaxaca. Mientras que en este trabajo se emplearon 16 registros de 6 eventos interplaca ($4.3 \leq M \leq 6.6$) analizados desde campo cercano a lejano (Trayectoria Guerrero-Querétaro, con distancias entre $100 \text{ km} \leq$

$R \leq 430$ km), que a diferencia de los anteriores trabajos se contó con datos de una nueva estación dentro del MVB. Conscientes de las anteriores diferencias particulares de análisis (análisis regional vs una trayectoria) y limitaciones de datos, se realizó una comparación para los tres eventos principales analizados en este trabajo ($M_w = 5.2, 5.6$ y 6.6) como se muestra en la figura 10 en donde es posible observar una sobrestimación de las curvas de Ordaz *et al.* (1989) respecto a las presentadas en este trabajo; esta diferencia es más relevante para los eventos de magnitud $M_w = 5.2$ y 5.6 . Por otro lado, para la curva correspondiente al evento de magnitud $M_w = 6.6$, en la cual el ajuste ha sido considerando un punto inferido y no observado en JUR1, se aprecia que pudiera presentar una menor sobrestimación. Esto tendría que ser verificado con datos observados. Mientras que con las curvas de la relación de atenuación de García (2006) se observan, en general, una mayor coincidencia con las presentadas en este trabajo, especialmente para las curvas correspondientes a los eventos de magnitud $M_w = 5.6$ y 6.6 ; no así el caso del evento de menor magnitud, que presenta una sobre estimación marcada a partir de la distancia hipocentral $R = 250$ km en adelante.

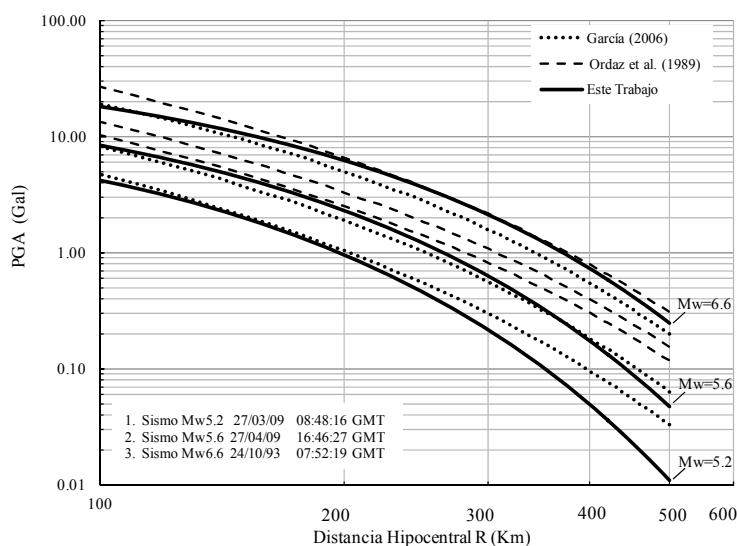


Figura 10. Comparación de curvas de las relaciones de atenuación indicadas respecto a la presentada en este trabajo, para las magnitudes de los tres eventos principales de análisis.

Analizando a detalle el comportamiento de las curvas presentadas en este trabajo respecto al de García (2006), en particular para la curva correspondiente a la magnitud $M_w = 6.6$, es posible observar que el decaimiento de la pendiente es más lento después de los 200 km, situación que parecía predecirse según la tendencia observada en la figura 4, al observar el grado de curvatura y la pendiente entre las curvas para $M_w = 5.2$ y para $M_w = 6.6$, por lo que es posible que la tendencia continúe para eventos de magnitudes mayores $M_w > 6.6$. Aún así, este hecho deja claro que la respuesta del suelo en la que se encuentra ubicada la estación JUR1 no presenta efectos de amplificación a pesar de hallarse dentro del MVB, al menos no para los eventos observados hasta el momento en JUR1 (eventos con valores de la PGA dentro del rango de frecuencias de entre 0.3 y 2 Hz. Esto identificado a través de los Espectros de Fourier de Aceleración).

Con el propósito de conocer el comportamiento de la señal sísmica, así como algunas comparaciones con el estudio de Cruz-Jiménez *et al.* (2009), fue realizado un análisis en términos del contenido de frecuencias con sus amplitudes de aceleración dentro de la trayectoria Guerrero-Querétaro, el

cual es mostrado en la figura 11a, para esto se utilizaron Espectros de Fourier de Aceleración (EFA) para analizar el sismo de magnitud $M_w=5.6$. A partir de EFA se estimaron amplitudes de aceleración para distintos valores de frecuencia (0.1, 0.3, 0.5, 2, 4, 10 y 15 Hz), esto fue hecho para cada registro de las estaciones en la trayectoria. En esta figura 11a, en la frecuencia 0.5 Hz se muestra una marcada tendencia a un decaimiento lento de la amplitud, más que una amplificación del suelo. Este comportamiento es similar para los demás eventos observados en JUR1 y es congruente con el estudio de Cruz-Jiménez *et al.* (2009) (ver figura 11b). El análisis de estos autores se basó en una modelación numérica sobre las diferencias de atenuación entre dos trayectorias perpendiculares a la costa del Pacífico Mexicano que parten de las fuentes sismogénicas en Colima y Guerrero con dirección hacia adentro del continente incluyendo parte del MVB. Ellos concluyeron que la atenuación en la trayectoria de Guerrero las amplitudes espectrales de aceleración en frecuencias de 0.5 Hz la señal se atenúa lentamente al entrar al MVB (trayectoria Guerrero-MVB), no así en el caso de la trayectoria Colima-MVB la cual mostró una marcada amplificación tanto en la frecuencia de 0.5 Hz como la de 4.0 Hz, como se muestra en las figuras 11b y 11c.

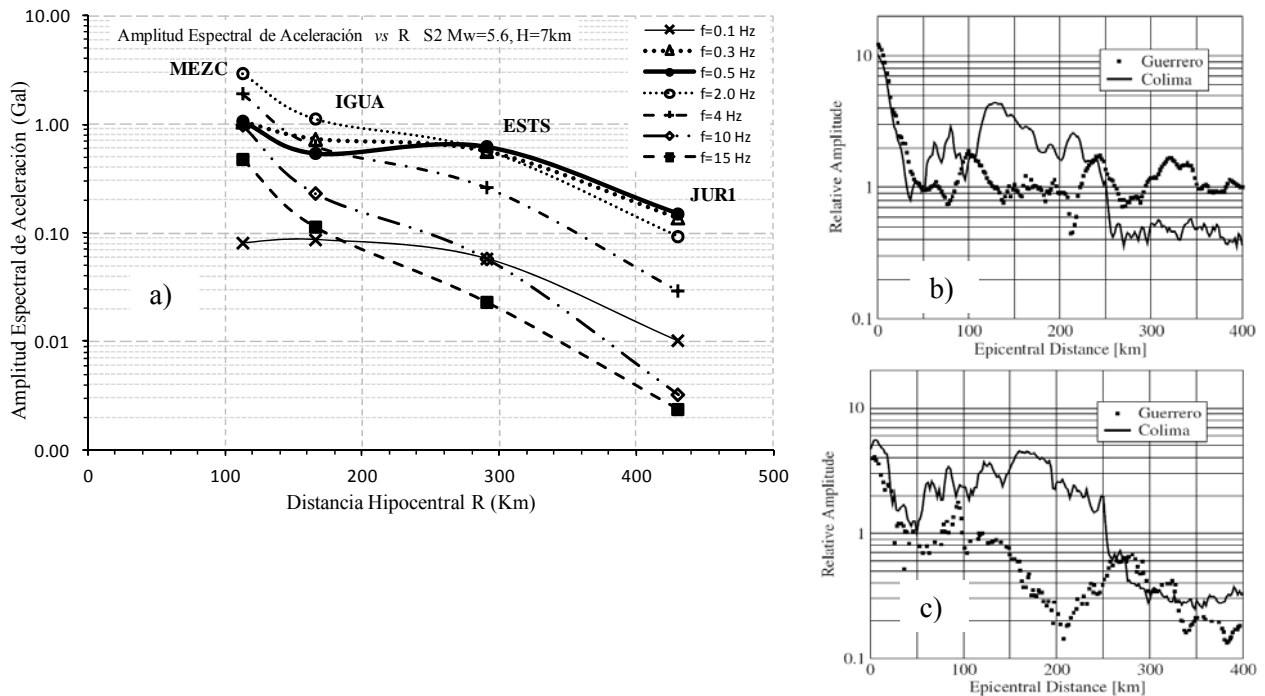


Figura 11. a) Análisis de la amplitud de EFA del terreno en la trayectoria Guerrero-Querétaro, acorde al contenido de frecuencia del evento No.2, realizado en este trabajo. Análisis con base en la amplitud relativa espectral de Fourier en frecuencias de 0.5 Hz y 4.0 Hz, para las trayectorias de: b) Guerrero-MVB y c) Colima-MVB, ambas reportadas por Cruz-Jiménez *et al.* (2009).

Otro aspecto que sustenta aún más dicho comportamiento de la atenuación en la trayectoria Guerrero-Querétaro es la estimación de velocidad aparente de las ondas P y S mostrada en la tabla 4 con valores de $V_p=6.6$ km/s y $V_s=3.6$ km/s respectivamente, a partir del registro en la estación JUR1 con base en el evento de $M_w=5.6$, muestran ser valores subestimados en su análisis de Cruz-Jiménez *et al.* (2009),

lo que justifica una mayor atenuación que la reportada en su modelación numérica al considerar valores de $V_p=4.0$ km/s y $V_s=2.0$ km/s para la zona del MVB. Por otro lado, estudios previos enfocados a la zona dentro del MVB (e.g., Campillo *et al.*, 1989; Shapiro *et al.*, 1997; Furumura y Kennett, 1998; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003) han reportado que el fenómeno de amplificación y duración en la fase L_g ocurren en frecuencias de 0.2 y 2.0 Hz, este comportamiento se muestra también en el sitio donde se localiza JUR1 (sitio localizado más al norte respecto a los sitios estudiados dentro del MVB), con valores de PGA dentro del rango de frecuencias de entre 0.3 y 2 Hz. Sin embargo, el análisis mostrado en la figura 11a, es consistente con un comportamiento de la señal que podría ser interpretado como un decaimiento lento de la amplitud al entrar al MVB, principalmente en las PGA asociadas a frecuencias de 0.3 y 2.0 Hz, mas no una amplificación del suelo. El comportamiento de la señal sísmica que ocurre a través de la trayectoria Guerrero-Querétaro, mostrada en la figura 11a, es consistente con lo reportado por Singh *et al.* (2007), Cruz-Jiménez *et al.* (2009) y García *et al.* (2009).

Tabla 4. Estimación de velocidad aparente de las ondas sísmica S y P, para la trayectoria Guerrero-Querétaro, basada en el evento (EP2) $M_w=5.6$.

Clave Estación	Distancia R (km)	Tiempos de arribo de la Onda Sísmica (Seg.)		Velocidad de la Onda Sísmica (km/seg)	
		P	S	V_p	V_s
JUR1	430.40	65.66	119.7	6.6	3.6
ESTS	291.01	41.87	82.23	7.0	3.5
CNPJ	270.51	40.54	81.91	6.7	3.3
CUER	233.47	34.49	65.02	6.8	3.6
IGUA	166.10	25.21	46.13	6.6	3.6
MEZC	113.08	17.31	30.77	6.5	3.7
$V_{promedio} =$				6.7	3.6

A pesar de que en esta zona no se han presentado eventos de magnitud $M_w=8.0$, es de nuestro interés conocer la estimación del PGA para Querétaro, para las magnitudes $M_w=5.0, 6.0, 7.0, 8.0$ y en particular para la magnitud de $M_w=7.6$ debido a que históricamente es el mayor sismo que se ha presentado en la zona de Guerrero. Las curvas de la relación de atenuación propuesta y de las relaciones previas (Ordaz *et al.*, 1989 y García, 2006) se presentan en la figura 12. Las predicciones de nuestro trabajo, a reserva de ser probado debido a la pequeña muestra de registros lo cual hace que nuestra relación de atenuación (ecuación 14) tenga un bajo nivel de confianza, son posibles a explicar que magnitudes grandes ($M_w>7.5$) impliquen mayores valores de aceleraciones pico en Querétaro, que corresponderían alrededor de 5 y 10 Gal para eventos de magnitud $M_w=7.6$ y $M_w=8.0$, respectivamente.

En general en la figura 12 se puede identificar una caída cada vez más lenta de la pendiente de las curvas conforme crece la magnitud, así como una tendencia en la disminución del grado de curvatura, lo cual es de esperarse para magnitudes grandes (M_w entre 7.0 y 8.0), apoyando lo expuesto por Atkinson y Boore (2003) sobre el hecho de que la dependencia de la magnitud se debe a que los grandes eventos tienen una gran extensión espacial.

El comportamiento de las curvas de atenuación de este trabajo respecto a los de comparación, mostradas en la figura 12, podría ser explicada por los siguientes puntos:

1. Considerando los datos de partida en cada una de las relaciones de atenuación, resulta lógico pensar que la de García (2006) presente curvas con un decaimiento más rápido de la pendiente al final de la

curva de atenuación (ver figura 12a, principalmente después de la curva que representa la magnitud $M_w = 6.0$), resultado de la combinación de datos de diversas trayectorias para las múltiples regresiones realizadas, dado que las trayectorias con dirección paralela a la costa presentan una mayor atenuación que para las trayectorias tierra adentro (e.g., Valdés *et al.*, 1987; Gutiérrez y Singh, 1988; Singh *et al.*, 1988; Cárdenas *et al.*, 1994, 1998; Ottemöller *et al.*, 2002; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003; García *et al.*, 2009).

- El comportamiento de las curvas presentadas en este trabajo, superiores a la curva que representa la magnitud $M_w = 6.0$, presentan valores mayores de la PGA respecto a las dos relaciones de atenuación en comparación, hecho que podría estar asociado implícitamente a que la PGA de uno de los eventos principales (evento EP2, $M_w=5.6$) se presenta en la frecuencia 0.5Hz, frecuencia a la cual la señal sísmica presenta las mayores amplitudes (PGA) correspondiendo una curva con un comportamiento de atenuación lento (ver figura 11a).

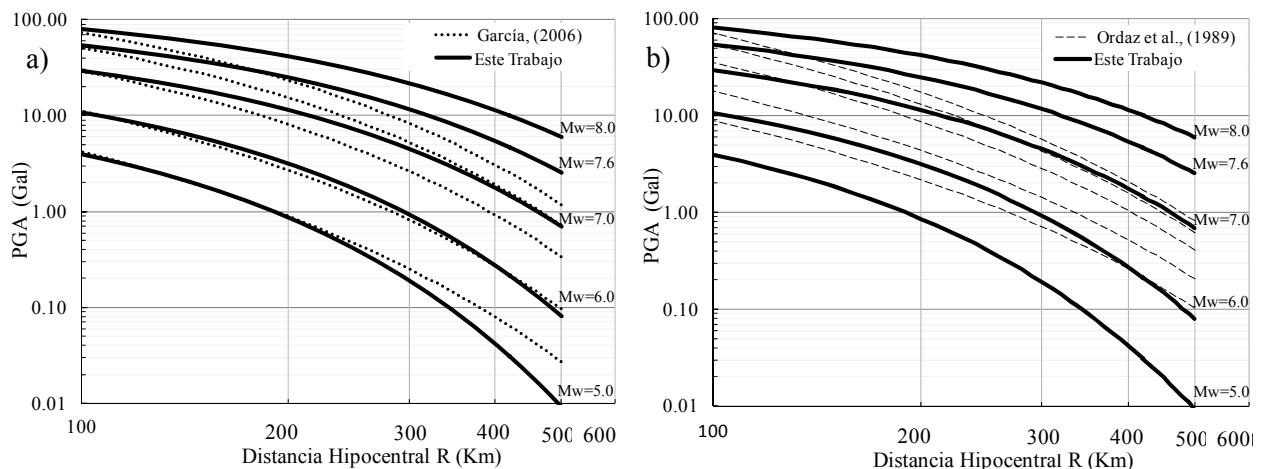


Figura 12. Comparación de PGA estimada entre las dos relaciones de atenuación según se indica, para $M_w=5.0$ a 8.0 en la trayectoria Gro-Qro. a) García (2006) y el presente trabajo. b) Ordaz *et al.* (1989) y el presente trabajo.

Tanto las curvas de atenuación presentadas en este trabajo como las determinadas por García (2006) coinciden en los puntos de partida y en el rango de distancias hipocentrales de entre 100 y 150 km (ver figura 12a), además de presentar un comportamiento similar en el grado de curvatura.

Por otro lado, los coeficientes de la relación de atenuación propuesta en este trabajo (ecuación 14) no resultan de fácil comparación con otras relaciones de atenuación, puesto que se encuentran en función de la magnitud M_w y profundidad H . Por lo anterior, se presenta una relación promedio que facilita el análisis de la similitud de sus coeficientes con otras relaciones de atenuación (e.g., Ordaz *et al.*, 1989; García, 2006) con lo cual es posible valorar la congruencia y sentido físico del fenómeno de atenuación sísmica regional.

Partiendo de la hipótesis de que la relación de atenuación obtenida del presente trabajo (ecuación 14) debería presentar resultados más congruentes con la relación de atenuación reportada por Ordaz *et al.* (1989) (ecuación 16), se propuso realizar una comparación entre ambas relaciones de atenuación. Esto con

el objetivo de analizar la congruencia entre los coeficientes de ambas relaciones. La comparación es consistente debido a que Ordaz *et al.* (1989) se basaron en datos sísmicos en su mayoría de la red acelerográfica de Guerrero. Sin embargo, debido a la naturaleza de nuestra relación de atenuación (ecuación 14), fue necesario obtener una relación promedio para ser comparada con la ecuación 16. Por lo que fue necesario evaluar la ecuación 14 para valores distintos de magnitud y profundidad, mostrados en la tabla 5, manteniendo constante solo el término independiente $a(M_w, H)$. De lo anterior, fueron obtenidos distintos valores para los coeficientes de anelasticidad (c_4) y expansión geométrica (g), a partir de los cuales se obtuvieron valores promedios que finalmente dieron forma a la relación de atenuación promedio (ecuación 15).

Tabla 5. Coeficientes promedio, estimados con la relación de atenuación de este trabajo, ecuación 14.

Mw	H(km)	a	Anelasticidad	Expansión Geométrica	
			C4	g	
5.2	30	- 0.250 + 0.325 Mw - 0.00608 H	-0.0065	0.0098	
5.6	7	"	-0.0056	-0.0239	
6.6	26	"	-0.0047	-0.0050	
7.0	21	"	-0.0041	-0.0144	
8.0	21	"	-0.0028	-0.0211	
Promedios=	6.5	21	- 0.250 + 0.325 Mw - 0.00608 H	-0.0047	-0.0109

$$\log PGA = -0.250 + 0.325M_w - 0.00608H - 0.0047R - 0.0109\log R \quad (15)$$

$$\log PGA = 1.76 + 0.300M_w - 0.0031R - \log R \quad (16)$$

Con el formato de la ecuación 15, es posible verificar la existencia de similitudes entre los coeficientes con mayor significancia entre la relación de atenuación promedio y la de Ordaz *et al.* (1989), como lo es la influencia debida por la magnitud M_w con un valor de alrededor de 0.325 y la distancia R con un valor de -0.0047, valores congruentes para estudios de atenuación de sismos interplaca en México (*e.g.*, Ordaz *et al.*, 1989; García, 2006).

Por otro lado, el coeficiente de expansión geométrica (g), está dentro del rango promedio definido por $g(R) = \sqrt{3} / \sqrt{50R}$ para distancias mayores a 150km, expuesto en el trabajo de García (2006) correspondiente a campo lejano, resultando para este trabajo un valor promedio de $g = -0.0109$ (con $R=430$ km, distancia promedio Guerrero-Querétaro). La comparación anterior respalda también el sentido físico y la congruencia de nuestra relación de atenuación.

Sin embargo, debe tenerse cuidado al seguir esta metodología de análisis por trayectoria, puesto que la dependencia de pocos datos puede a llevar una mínima variación en los coeficientes y que ésta represente grandes variaciones en los resultados finales, cayendo quizás en un comportamiento correspondiente a sismos intraplaca. Es importante mencionar que es fundamental realizar una buena selección de eventos representativos del fenómeno de sismicidad así como de estudios previos de relevancia (*e.g.*, Joyner y Boore, 1981; Ordaz *et al.*, 1989; Atkinson y Boore, 2003; García, 2006), que hagan posible la calibración y obtener resultados confiables.

LIMITACIÓN DE LA RELACIÓN DE ATENUACIÓN

La relación de atenuación para la PGA (ecuación 14), presenta las siguientes limitaciones:

1. Es válido para una sola trayectoria de estudio: Trayectoria Guerrero-Querétaro.
2. Es válido sólo para sismos del tipo interplaca a profundidades entre 5 y 30 km, con menor incertidumbre.
3. Es aplicable dentro de la trayectoria Guerrero-Querétaro, para el rango de distancias hipocentrales de entre 100 y 500 km.
4. Existe incertidumbre al predecir el comportamiento para magnitudes mayores $M_w \geq 6.6$, puesto que a diferencia de las relaciones de atenuación en comparación, la base de datos de este trabajo corresponde a eventos de menor magnitud M_w (4.3 - 6.6). Nuestra idea está sustentada en que la tendencia de la PGA presenta un comportamiento lineal, en escala logarítmica (ver figura 3) con los datos observados en la estación JUR1.

CONCLUSIONES

Se presentó un estudio del fenómeno de atenuación sísmica basada en una pequeña muestra de datos sísmicos recientes (2009 y 2010) con interés particular del análisis por trayectoria. El caso particular de la trayectoria Guerrero-Querétaro fue posible gracias a la inclusión de la estación JUR1, la cual hizo posible conocer en primera instancia el comportamiento de la señal sísmica observada en la ciudad de Querétaro proveniente de la zona de subducción del Pacífico Mexicano con fuente en Guerrero, región sismogénica de gran interés por la generación de grandes eventos (*e.g.*, 1957, 1962 y 1989 con magnitudes de $M_s=7.5$, 7.2 y 6.9, respectivamente) y por el potencial sísmico asociado a la llamada brecha de Guerrero.

Por otra parte, el presente trabajo apoya y sustenta aún más el análisis de atenuación por trayectoria, con respecto al análisis de múltiples trayectorias en estudios regionales. La atenuación observada en los registros de la estación JUR1 ubicada a 430km de la zona de Guerrero, principalmente para la frecuencia de 0.5Hz, concuerdan con: a) el modelo numérico de Cruz-Jiménez *et al.* (2009) que sustenta un decaimiento más lento para la amplitud de las ondas sísmicas a su paso por el MVB y b) lo reportado por García *et al.* (2009) respecto al comportamiento de la atenuación sísmica con dirección al interior del continente.

El comportamiento de atenuación de las ondas sísmicas hasta la estación JUR1, tiene ciertas variantes inesperadas que podrían explicarse de la siguiente manera:

1. Dada la incertidumbre que implica el uso de una PGA inferida en JUR1 para un evento de $M_w=6.6$, el cual es en gran parte el sustento en la obtención de la relación de atenuación para la trayectoria Guerrero-Querétaro, es posible que la relación de atenuación propuesta en este trabajo (ecuación 14), prediga valores de la PGA superiores a la propuesta por García (2006) para la curva de referencia correspondiente a la magnitud de $M_w=6.2$, mientras que para magnitudes inferiores a la curva de referencia, la relación de atenuación de García (2006) puede ser la que sobrestime los valores de la

PGA respecto a los mostrados en este trabajo en la figura 12a. Algo semejante puede presentarse con la relación de atenuación de Ordaz *et al.* (1989), sólo que para el valor de referencia correspondiente a la magnitud de $M_w=6.6$, como se aprecia en la figura 12b. En general las tendencias de las curvas para los tres eventos principales, se pueden justificar: a) porque la PGA de algunos de los eventos analizados ocurre en la frecuencia de 0.5Hz, lo que implica que las curvas presenten un lento decaimiento (figura 11a); b) Porque la relación que guardan las curvas de los tres principales eventos de análisis, se conserva al inferir las curvas para las magnitudes mayores ($M_w > 5.6$), esta segunda suposición está justificada porque existe una relación lineal entre los coeficientes de cada curva así como por el comportamiento lineal entre PGA y M_w , sustentado con datos observados en la estación JUR1, como se mostró en la figura 3.

2. Aunque algunos autores reportaron la existencia de una amplificación notoria en la zona del MVB, en este trabajo se ve claramente que los datos observados en la nueva estación JUR1, no presentan efectos de amplificación, sino más bien un decaimiento lento de la atenuación con amplitudes máximas (PGA) asociadas a las frecuencias de 0.3, 0.5 y 2.0 Hz (ver figura 11a).
3. Los puntos anteriores implican que Querétaro parece estar vulnerable principalmente ante eventos de mayor magnitud con predicciones de $PGA > 5$ Gal, que corresponde a eventos de magnitud $M_w > 7.6$, valor que podría estar subestimado con las relaciones de atenuación previas (Ordaz *et al.*, 1989 y García, 2006). Sin embargo, cabe aclarar que la estimación de PGA de la relación de atenuación presentada en este trabajo, para eventos con magnitud $M_w \geq 6.6$, es una condición a ser comprobada.

Respecto a la relación de atenuación presentada en este trabajo (ecuación 14) podemos destacar que se minimiza la desviación estándar s_R de los residuos, en comparación a los que García (2006) presenta en su relación de atenuación, pasando de 0.33 a 0.21 lo que implica en factor de 2.13 a 1.62, respecto a los valores observados (ver figura 7). Esta menor desviación es una ventaja de analizar solo una trayectoria en particular. Con esto podemos asegurar un grado de confiabilidad muy buena en nuestras predicciones, al menos para el rango de magnitudes analizadas en este trabajo ($4.3 \leq M_w \leq 6.6$). En cuanto a la relación de atenuación de Ordaz *et al.* (1989), reportan una desviación estándar s_R de 0.25, lo cual quiere decir, tener factores de sobreestimación de 1.78 respecto a los observados.

Por último, se hace énfasis que a pesar de tratarse de una trayectoria en particular, que no se había estudiado con anterioridad debido a la falta de datos locales, este trabajo da pie para el principio metodológico para continuar estimando la PGA del suelo, para posteriormente estimar el cálculo de familias de espectros de respuesta escalados en función de la determinación de relaciones de atenuación por trayectorias para distintas fuentes. En nuestro caso para la fuente correspondiente a la zona de subducción (desde Colima hasta Oaxaca) que pudieran afectar a la ciudad de Querétaro. De esta manera estaríamos delimitando una reglamentación del peligro sísmico regional sustentado en registros locales observados, para posteriormente aplicar dicha metodología a otras entidades que carecen de un estudio regional de peligro sísmico en función de mediciones reales-observadas en el sitio de interés.

No olvidando que existe una diferencia en la cantidad de registros de partida en cada una de las relaciones de atenuación así como de la metodología propuesta de análisis por una trayectoria, por lo que este trabajo promete ser una opción de metodología de análisis a corto plazo a partir de una pequeña muestra representativa de datos y no estar supeditados a una gran base de datos, principal problema en estudios de sismicidad.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT que, a través de las universidades UAQ y UNAM, brindó apoyo financiero al primer y cuarto autor, respectivamente.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres de México CENAPRED, por sus atenciones, colaboración y proporción de datos, lo cual hizo posible este trabajo.

Agradecemos al editor y a los comentarios de dos revisores anónimos que mejoraron la calidad del artículo.

REFERENCIAS

- Anderson, J G, P Bodin, J N Brune, J Prince, S K Singh, R Quaas, y M Oñate (1986), “Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake”, *Science* Vol. 233, No. 4768, pp. 1043-1049. Doi: 10.1126/science.233.4768.1043.
- Atkinson, G M y D M Boore (2003), “Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 1703-1729.
- BMDSF-SMIS (1997),” Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes”, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica-SMIS*, México.
- Bufaliza, M (1984), “Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos mexicanos”, *Tesis de Maestría*, Facultad de Ingeniería UNAM.
- Bustillos, J M (2005), “Microzonificación sísmica del Valle de Querétaro”, *Tesis Maestría* FI UAQ.
- Campillo, M, J C Gariel, K Aki, y F J Sánchez-Sesma (1989), “Destructive strong ground motion in Mexico City: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacan earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 6, pp.1718-1735.
- Cárdenas, M, J Lermo y F Núñez-Cornú (1994), “Atenuación de la energía sísmica en el graben de Colima”, *GEOS*, Vol. 14, No. 5, pp. 112.
- Cárdenas, M, F Núñez-Cornú, J Lermo, D Córdoba, y A González (1998), “Seismic energy attenuation in the region between the coast of Guerrero and Mexico City: differences between paths along and perpendicular to the coast”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 105, No. 1, pp. 47-57.
- Cárdenas-Soto, M y F J Chávez-García (2003), “Regional path effects on seismic wave propagation in Central Mexico”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No.3, pp. 973-985. doi:10.1785/0120020083.
- Castro, R R, J G Anderson, y S K Singh (1990), “Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, No.6, pp. 1481-1503.
- Castro, R R, L Munguía L, C J Rebollar y J G Acosta (1994), “A Comparative analysis of the quality factor Q for the regions of Guerrero and Oaxaca, Mexico”, *Geofísica Internacional*, Vol. 33, No. 3, pp. 373-383.

- Cruz-Jiménez, H, F J Chávez-García y T Furumura (2009), “Differences in attenuation of ground motion perpendicular to the Mexican subduction zone between Colima and Guerrero: An Explanation based on numerical modeling”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 1, pp. 400–406. Doi: 10.1785/0120080167
- Domínguez, T, C J Rebollar, y R R Castro (1997), “Regional variations of seismic attenuation of Lg waves in Southern Mexico”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B12, pp. 27501-27509. Doi:10.1029/97JB02332.
- Esteva, L y R Villaverde (1973), “Seismic risk, design spectra and structural reliability”, *Proc. 5th World Conf. Earthquake Eng.*, pp. 2586-2597.
- Ferrer-Toledo, H, F J Chávez-García y M Cárdenas-Soto (2004), “Ground motion in Central Mexico. Path effects due to the Transmexican Volcanic Belt”, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, paper no. 948.
- Figuroa, A, A Clemente-Chávez y R Zúñiga (2010), “Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM”, *Bol-e Órgano de comunicación electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM*, Vol. 6, No. 1.
- Furumura, T y B L N Kennett (1998), “On the nature of regional seismic phases-III. The influence of crustal heterogeneity on the wavefield for subduction earthquakes: The 1985 Michoacan and 1995 Copala, Guerrero, Mexico earthquakes”, *Geophysical Journal International*, Vol. 135, No. 3, pp.1060-1084. Doi: 10.1046/j.1365-246X.1998.00698.x.
- Furumura, T y S K Singh (2002), “Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes; the attenuation functions for inter-plate and inslab events”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 6, pp. 2110-2125. Doi:10.1785/0120010278.
- García, J D (2001), “Atenuación sísmica. Aplicación a terremotos intraplaca en México Central”, *Trabajo de investigación para obtener el grado de doctorado*, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- García, J D, S K Singh, M Herráiz, M Ordaz y J F Pacheco (2005), “Inslab earthquakes of Central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 6, pp. 2272-2282.
- García, J D (2006), “Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central”, *Memoria para el grado de Doctorado*, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- García, J D, S K Singh, M Herraiz, M Ordaz, J F Pacheco y H Cruz-Jimenez (2009), “Influence of subduction zone structure on coastal and inland attenuation in Mexico”, *Geophysical Journal International*, Vol. 179, No.1, pp. 215-230.
- Gutiérrez, C y S K Singh (1988), “Evidencias de amplificación de fases sísmicas hacia dentro del continente respecto a trayectorias a lo largo de la costa del Pacífico, en México”, *GEOS*, No. 155.
- Iida, M y H Kawase (2004), “A comprehensive interpretation of strong motions in the Mexican Volcanic Belt”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No.2, pp. 598–618.
- Joyner, W B y D M Boore (1981), “Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 6, pp. 2011-2038.

- Kanamori, H (1977), “The energy release in great earthquakes”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. B20, pp. 2981–2988.
- Kawase, H y K Aki (1989), “A study on the response of a soft Basin for incident S, P, and Rayleigh waves with spectral reference to the long duration observed in Mexico City”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 5, pp. 1361-1382.
- MDOC-CFE (2008), “Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por sismo” *Comisión Federal de Electricidad-CFE*, México.
- Nava, F A, R García-Arthur, R R Castro, C Suárez, B Márquez, F Núñez-Cornú, G Saavedra y R Toscano (1999), “S wave attenuation in the coastal region of Jalisco-Colima, Mexico”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 115, No. 3-4, pp. 247-257. Doi:10.1016/S0031-9201(99)00114-4.
- Nishenko, S P y S K Singh (1987a), “The Acapulco-Ometepec, Mexico earthquakes of 1907-1982: Evidence for a variable recurrence history”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 4, pp. 1359-1367.
- Nishenko, S P y S K Singh (1987b), “Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 6, pp. 2095-2114.
- Novelo, D A y C Valdés (2000), “Coda wave attenuation parallel and perpendicular to the Mexican Pacific coast”, *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 13, No. 4-5, pp. 469-476. doi:10.1016/S0895-9811(00)00037-7.
- Ordaz, M, J M Jara, y S K Singh (1989), “Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero”, *Mem. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, México, pp. D40–D56.
- Ordaz, M, y S K Singh (1992), “Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No.1, pp. 24-43.
- Ortega, R, R B Herrmann y L Quintanar (2003), “Earthquake ground-motion scaling in central Mexico”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 1, pp. 397-413.
- Ortega, R y L Quintanar (2005), “A study of local magnitude scale in the Basin of Mexico: Mutually consistent estimate of logA0 and ground motion scaling”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, pp. 605-613.
- Ottmöller, L, N M Shapiro, S K Singh y J F Pacheco (2002), “Lateral variation of Lg wave propagation in Southern Mexico”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. B1, 2008, doi:10.1029/2001JB000206.
- Rebollar, C J, L Munguía, A Reyes, A Uribe y O Jiménez (1991), “Estimates of shallow attenuation and apparent stresses from aftershocks of the Oaxaca earthquake of 1978”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, No. 1, pp. 99-108.
- Rodríguez, M, J Havskov y S K Singh (1983), “Q for coda waves near Petatlan, Guerrero, Mexico”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 1, pp. 321-326.
- Sánchez-Sesma, F J, S Chávez-Pérez, M Suárez, M A Bravo y L E Pérez-Rocha (1988), “The Mexico earthquake of September 19, 1985; on the seismic response of the Valley of Mexico”, *Earthquake Spectra*, Vol.4, No. 3, pp. 569-589. doi:10.1193/1.1585491.
- SSN (2010), “<http://www.ssn.unam.mx>, <http://laxdoru.igeofcu.unam.mx>”, *Servicio Sismológico Nacional – SSN*, México.

- Shapiro, N M, M Campillo, A Paul, S K Singh, D Jongmans y F J Sánchez-Sesma (1997), "Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico", *Geophysical Journal International*, Vol. 128, No.1, pp. 151-166.
- Singh, S K, L Astiz y J Havskov (1981), "Seismic gaps and recurrence period of large earthquake along the Mexican subduction zone: a reexamination", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 3, pp. 827-843.
- Singh, S K, J M Espindola, J Yamamoto y J Havskov (1982), "Seismic potential of Acapulco-San Marcos region along the Mexican Subduction zone", *Geophysical Research Letters*, Vol. 9, No. 6, pp. 633-636. Doi:10.1029/GL009i006p00633.
- Singh, S K, E Mena, R Castro y C Carmona (1987), "Empirical prediction of ground motion in Mexico City from coastal earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No.5, pp. 1862-1867.
- Singh, S K, E Mena y R Castro (1988), "Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 2, pp. 451-477.
- Singh, S K, M Ordaz, J G Anderson, M Rodríguez, R Quaas, E Mena, M Ottaviani, y D Almora (1989), "Analysis of near-source strong-motion recordings along the Mexican subduction zone", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 6, pp.1697-1717.
- Singh, S K, J F Pacheco, M Ordaz y V Kostoglodov (2000), "Source time function and duration of Mexican earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No.2, pp. 468-482. doi:10.1785/0119990081.
- Singh, S K, A Iglesias, D García, J F Pacheco y M Ordaz (2007), "Q of Lg waves in the Central Mexican Volcanic Belt", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No.4, pp. 1259-1266.
- Valdés, C, D Novelo y R P Meyer (1987), "Contrast in coda Q parallel and perpendicular to the Mexican Pacific coast", *EOS* Vol. 68, No. 44, pp. 1362.