

## ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN SITIOS CERCANOS A LA FUENTE SÍSMICA

Andrés Gama García<sup>1</sup>, Alonso Gómez Bernal<sup>2</sup>, Jorge Aguirre González<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 02200, México, D.F.; Tel: 53189455, Fax: 53189480.

<sup>2</sup> Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 02200, México, D.F.; Tel-fax: (55)53189085.

<sup>3</sup> Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Torre de Ingeniería, 2° Nivel, Ala Sur, Cubículo 2; Tel. (5255) 56233500 Ext. 1262.

E-mail: [al206381854@alumnos.azc.uam.mx](mailto:al206381854@alumnos.azc.uam.mx)

E-mail: [agb@correo.azc.uam.mx](mailto:agb@correo.azc.uam.mx)

E-mail: [joagg@pumas.iingen.unam.mx](mailto:joagg@pumas.iingen.unam.mx)

### RESUMEN

Se presentan resultados de un estudio de peligro sísmico aplicado a la ciudad de Chilpancingo con un enfoque Neo-Determinista. La escasa información acelerométrica, principalmente de sismos de gran magnitud con epicentros a distancias relativamente cercanas al sitio (menos de 100 km), justificó la simulación de acelerogramas aplicando el método de las Funciones de Green Empíricas. Se encontró un fuerte efecto de la directividad con respecto al sitio. Como resultado del análisis espectral de los acelerogramas sintéticos producidos por la fuente sísmica Guerrero Central (GC), se observó que los sismos que se generen en esta fuente, con distancias epicentrales de alrededor de 70 km y con profundidades de alrededor de 25km, pueden provocar daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo, que estén comprendidas en un intervalo de periodos estructurales de 0.30 a 2.5 s. Además, se calcularon las curvas de peligro sísmico con los acelerogramas sintéticos para las diferentes fuentes sísmicas, considerando la distribución de magnitudes propuesta en cada caso. Finalmente, se se compararon las relaciones de atenuación determinadas con acelerogramas sintéticos, contra las obtenidas con acelerogramas registrados, encontrándose una correlación aceptable. Al estudiar el peligro sísmico generado por las diferentes fuentes sísmicas de subducción, se observó que la fuente sísmica GC genera el mayor peligro sísmico para Chilpancingo.

Palabras clave: peligro sísmico, fuentes sísmicas, Neo-Determinista, acelerogramas, Chilpancingo.

### ABSTRACT

In this paper, we offer the results of a seismic hazard study for the city of Chilpancingo using a Neo-Deterministic approach. The lack of accelerographic data, mainly from large magnitude earthquakes having their epicenters with distances relatively close to the site (less than 100 km), justified the accelerograms simulation with the Empirical Green Functions Method. A strong effect of the directivity with respect to the site was found. From the spectral analysis of the synthetic accelerograms produced by the Guerrero Central (GC) seismic source, it was observed that the earthquakes generated in this source,

with epicentral distances close to 70 km and with depths around 25 km, might cause damage to the constructions in Chilpancingo city, within a structural period interval between 0.30 and 2.5 s. Furthermore, the seismic hazard curves were determined by the synthetic accelerograms for the different seismic sources, considering the Magnitude distribution proposed for each case. Finally, attenuation relationships determined by synthetic accelerograms were compared to those obtained by observed accelerograms, where an acceptable correlation was found. When studying the seismic hazard generated by the different subduction seismic sources it was determined that the GC seismic source represents the highest seismic hazard for Chilpancingo.

Key words: seismic hazard, seismic sources, Neo-Deterministic, accelerograms, Chilpancingo.

## INTRODUCCIÓN

La asignación del peligro sísmico, basada en el método tradicional de Análisis de Peligro Sísmico Probabilista (APSP) se basa en los catálogos sísmicos y de movimiento del terreno, en observaciones macrosísmicas y en registros instrumentales. Recientemente, los análisis de peligro sísmico probabilista han mostrado cierta limitación para proporcionar una estimación del peligro sísmico confiable, básicamente debido a la información insuficiente acerca de la sismicidad histórica, la cual puede introducir errores relevantes en el enfoque puramente estadístico, principalmente basado en la historia sísmica. Las mayores incertidumbres y fuentes de errores del método APSP han sido señaladas por varios especialistas recientemente. Ver, por ejemplo a Klügel *et al.* (2006; 2007a y 2007b). El error estándar de las ecuaciones de atenuación empíricas (o la diferencia entre observación y cálculo de un modelo físico predictivo) es una de las principales fuentes de error en el método APSP tradicional, interpretado como incertidumbre aleatoria y no entendido como un cálculo de la variabilidad total del proceso estocástico de la ecuación de atenuación (limitado por nuestro conocimiento).

Debido a que los datos sismológicos son limitados, parece más apropiado recurrir a un escenario basado en un enfoque determinista (Panza *et al.*, 2008). La principal ventaja del procedimiento Neo-Determinista (Panza *et al.*, 2008) es el tratamiento simultáneo de la contribución de

la fuente sísmica y la propagación de la onda sísmica para el movimiento fuerte objetivo sobre la región/sitio, utilizando los principios físicos básicos. Un breve análisis comparativo entre los dos enfoques de peligro sísmico tradicionalmente usados: APSP y APSD (Análisis de Peligro Sísmico Determinista), y el método de Peligro Sísmico Neo-Determinista (APSND), se presentan en la tabla 1, modificada de Panza *et al.* (2008). El método APSND presenta ventajas en comparación con el enfoque APSP, debido a que APSND debe considerar escenarios sísmicos realistas y altamente cuantitativos sobre niveles locales y regionales en la evaluación del peligro sísmico.

## LEY DE RECURRENCIA

La ley de Gutenberg-Richter fue desarrollada a partir de una serie de datos regionales que incluyeron muchas fuentes sísmicas diferentes. Los análisis de peligro sísmico probabilista son conducidos usualmente para sitios específicos, más que para grandes regiones, donde la generación de sismos característicos de fallas individuales es importante. En años recientes la capacidad de la ley de Gutenberg-Richter para representar el comportamiento de una sola fuente ha sido cuestionada (Schwartz y Coppersmith, 1984; Schwartz, 1988). Sus tasas históricas de recurrencia pueden ser estimadas por medio del registro de sismos característicos. Evidencias geológicas indican que el sismo característico ocurre más frecuentemente

que el obtenido por extrapolación de la ley Gutenberg-Richter de altas tasas de excedencia (baja magnitud) a bajas tasas de excedencia (alta magnitud). El resultado es una ley de recurrencia más compleja que es gobernada por datos de sismicidad a bajas magnitudes y datos geológicos sobre altas magnitudes.

Youngs y Coppersmith (1985) desarrollaron una función generalizada de densidad magnitud-frecuencia que combinó una distribución exponencial de la magnitud sobre las magnitudes más bajas con una distribución uniforme en la vecindad del sismo característico. Otras leyes de recurrencia han sido propuestas (Merz y Cornell, 1973a) usando una expresión cuadrática para describir la tasa media anual sobre la cual sismos de magnitud más grande que  $m_0$  y menor que  $m_{\text{máx}}$  son excedidos. Shah *et al.* (1975) usaron una ley de recurrencia bilineal en una evaluación del riesgo sísmico para Nicaragua. En otro enfoque, la ley de Gutenberg-Richter fue modificada sobre las bases del momento sísmico y deslizamiento de la falla (Lomnitz-Adler y Lomnitz, 1979). De los

criterios anteriores, por su sencillez y claridad, la ley de recurrencia que mejor funciona es la de Youngs y Coppersmith (1985).

El estudio de la sismicidad regional puede ser descrito como un procedimiento de cuatro pasos:

1. Determinar todas las fuentes sísmicas que puedan generar peligro sísmico para el sitio (Chilpancingo, en el presente caso). Las fuentes de terremotos deben de tener características sísmicas y tectónicas homogéneas.
2. Definir los catálogos sísmicos de cada una de las fuentes con el fin de deducir las leyes estadísticas de la actividad sísmica futura.
3. Determinar la relación de recurrencia para cada una de las fuentes sísmicas. El sismo mínimo puede ser definido con el criterio de la mínima magnitud capaz de producir daño a las construcciones en el sitio (Chilpancingo).

Tabla 1. Resumen comparativo de los procedimientos de evaluación del peligro sísmico, APSP, APSD y APSND (Según Panza et al., 2008)

| Descripción del procedimiento | APSP                                                                                                                                                                                                                                                                        | APSD                                                                                     | APSND                                                                                                                                 |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paso 1                        | Fuentes sísmicas:<br>Identificación de zonas sismogénicas y fallas activas<br>Epicentros: Geometría y mecanismo focal                                                                                                                                                       |                                                                                          |                                                                                                                                       |
| Paso 2                        | Tasa de recurrencia puede ser representada por una relación lineal solamente si el tamaño del área de estudio es grande con respecto a las dimensiones lineales de las fuentes.                                                                                             | Magnitud fija.<br>Distancia fija.<br>Selección del sismo de control.                     | -Escenarios sísmicos-<br>Magnitudes fijas, distancias y propiedades específicas de la fuente sísmica. Selección del sismo de Control. |
| Paso 3                        | -Relaciones de atenuación-<br>Ellas representan la dependencia funcional de la aceleración espectral aleatoria sobre las variables aleatorias, magnitud, distancia y error de medición y por lo tanto son fuente de error sistemático en la evaluación del peligro sísmico. |                                                                                          | Movimientos sintéticos del terreno.<br>No necesita de relaciones de atenuación.                                                       |
| Paso 4                        | Evaluación del peligro sísmico en términos de probabilidades de excedencia de una medida del movimiento del terreno dada.                                                                                                                                                   | Valoración del peligro sísmico en términos de la medida fija del movimiento del terreno. | Evaluación del peligro sísmico con envolventes de PGA u otra medida del movimiento del terreno.                                       |

4. Seleccionar el sismo característico ó sismo máximo. La elección del terremoto máximo es más complicado, no solo interesa el máximo sino también su probabilidad de ocurrencia. Por ello, la consideración del máximo terremoto histórico conocido como el valor mínimo para el límite superior, debe ser realizada a la luz de la experiencia.

Por otro lado, la prolongación de la línea de ajuste de la ley de recurrencia informaría sobre

el sismo máximo que se puede esperar en la zona de estudio. Sin embargo, como se ha comentado, en la práctica este sismo máximo se estima a partir de las dimensiones de la falla, de características de la zona de subducción, de información paleosísmica, etc. Aunque existen excepciones (Reiter, 1990), muchas veces se elige como valor mínimo para este límite, el máximo terremoto histórico conocido. En la figura 1, se describe con un diagrama de flujo la manera en que puede evaluarse la sismicidad regional.

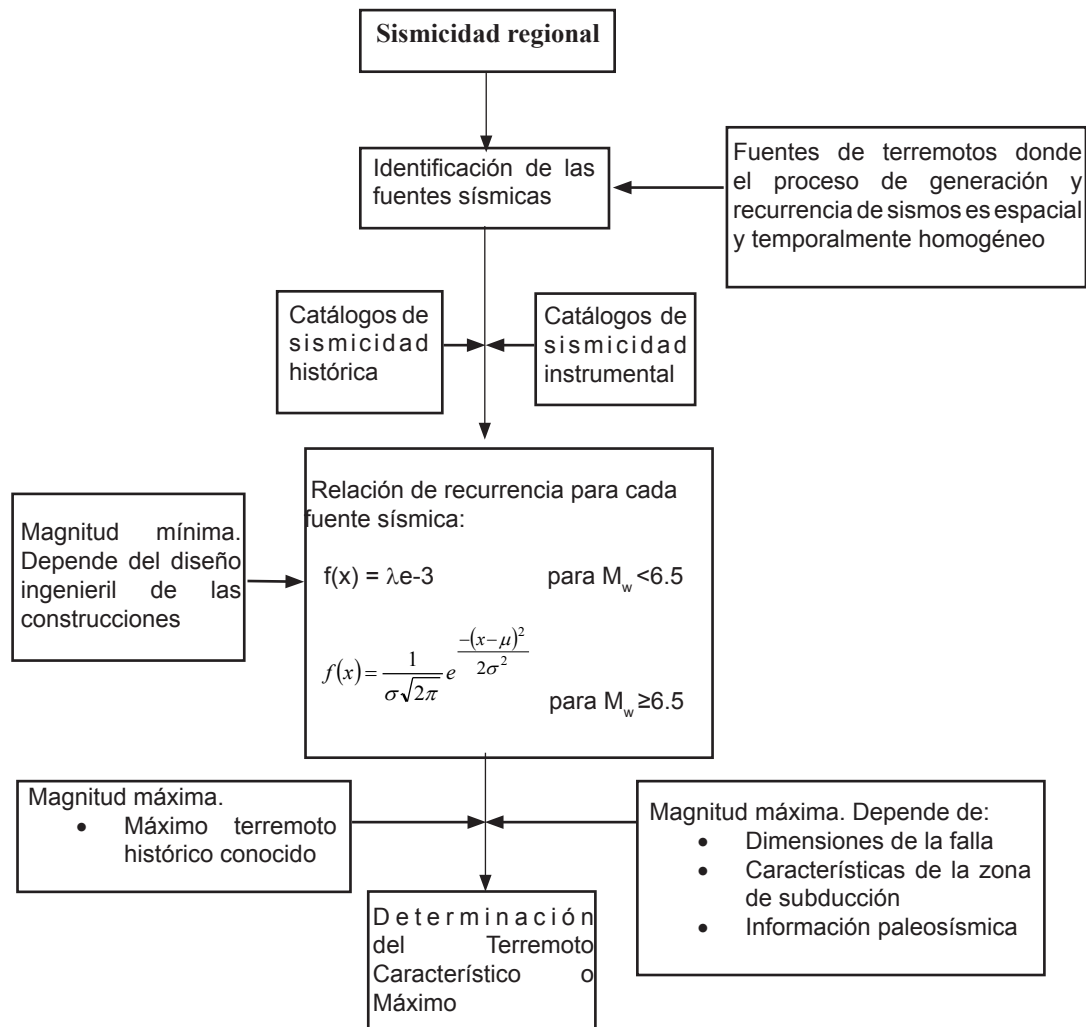


Figura 1. Diagrama de flujo para evaluar la sismicidad de la fuente sísmica.

## MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN

Con el propósito de desarrollar la metodología presentada en este trabajo, es necesario aplicar el método de las funciones de Green empíricas. A continuación se describe de manera general el procedimiento, incluyendo el modelo de sismicidad usado, así como sus características más importantes. Este método ha sido usado con frecuencia para simular exitosamente los registros de velocidad y aceleración en zonas cercanas a la fuente sísmica (Kamae e Irikura, 1998; Matsushima y Kawase, 2000; Miyake *et al.*, 2003; Asano *et al.*, 2005; Suzuki *et al.*, 2005; Asano e Iwata, 2006). Está basado en la superposición de registros de eventos pequeños considerados como una función empírica de Green y fue propuesto primeramente por Hartzell (1978); posteriormente lo continuaron desarrollando y/o complementando varios otros autores, entre los que destaca Irikura (1983; 1986). La superposición de los subeventos sobre el área de la falla del sismo objetivo se hace de tal forma que cubran las áreas que corresponden a las asperezas. Éstas equivalen a las áreas de generación de movimientos fuertes de donde se irradia casi el total de la energía observada en campo cercano. El método de Green simula registros acelerométricos a través del modelado de fuentes sísmicas finitas, utilizando el registro de un sismo pequeño (función de Green) para simular el sismo principal (objetivo). Utilizando el método sintético para el modelo espectral  $\omega^2$  propuesto por Aki (1967), se obtiene el número de subeventos necesarios  $N^3$  a partir de la relación entre los momentos sísmicos del sismo principal que será simulado y el sismo pequeño que se usa como función de Green.  $N^3$  es el número de subfallas en dirección del rumbo ( $N_x$ ), del echado ( $N_w$ ) y del número de eventos sumados en cada subfalla que generan el aumento de desplazamiento y duración ( $N_T$ ):

$$N^3 = N_x N_w N_T \quad (1)$$

Se debe entonces encontrar el parámetro  $N$  que sirve para estimar el área de la falla del sismo principal ya que se divide en  $N \times N$  subfallas, el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{\overline{U}_0}{\overline{u}_0} = \frac{M_0}{m_0} = N^3 \quad (2)$$

Donde  $\overline{U}_0$  y  $\overline{u}_0$  corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de desplazamiento del sismo principal y del sismo pequeño, respectivamente. De igual manera  $M_0$  y  $m_0$  son los momentos sísmicos del movimiento principal y del sismo pequeño, respectivamente. La relación para las frecuencias altas está dada por (Somerville *et al.*, 2002):

$$\frac{\overline{A}_0}{\overline{a}_0} = \left( \frac{M_0}{m_0} \right)^{\frac{1}{3}} = N \quad (3)$$

donde  $\overline{A}_0$  y  $\overline{a}_0$  corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de aceleración del sismo principal y del sismo pequeño para frecuencias mayores a  $f_c$  y menores a  $f_{\max}$ . Entonces el movimiento sintético del sismo principal  $A(t)$ , estará dado por el movimiento observado del sismo pequeño  $a(t)$ , con base en las siguientes ecuaciones (Irikura, 1986).

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_w} \left( \frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t - t_{ij}) * a(t) \quad (4)$$

$$F_{ij}(t - t_{ij}) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{K=1}^{(N-1)n'} \delta \left[ t - t_{ij} - \frac{(K-1)\tau}{(N-1)n'} \right] \quad (5)$$

$$t_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{V_r} + \frac{(r_{ij} - r_0)}{\beta} \quad (6)$$

Donde  $n'$  es un entero apropiado para eliminar periodicidad espuria,  $r_0$  es la distancia de la estación al punto donde inicia la ruptura,  $r$  es la distancia de la estación al hipocentro del

sismo pequeño,  $r_{ij}$  es la distancia de la estación al elemento (i,j) del área de generación del movimiento fuerte,  $t_{ij}$  es el tiempo de retraso para la ruptura del punto de salida del elemento (i,j) al sitio observado,  $\tau$  es el tiempo de ascenso (rise time) del sismo pequeño,  $F_{ij}$  es una función filtro para ajustar la diferencia entre el tiempo de dislocación del sismo principal y del sismo pequeño. Para usar el movimiento del sismo pequeño con caída de esfuerzos diferente a la del sismo principal, se modifica la función de Green empírica, introduciendo un valor constante que sirve para corregir la diferencia entre la caída de esfuerzos del sismo principal y del sismo pequeño, tal que:

$$C = \frac{\Delta\sigma_{SP}}{\Delta\sigma_R} \quad (7)$$

donde  $\Delta\sigma_{SP}$  es la caída de esfuerzos del sismo principal y  $\Delta\sigma_R$  es la caída de esfuerzos del sismo pequeño. El nivel espectral es afectado por el mismo factor de la ecuación anterior, por lo que queda de la siguiente manera:

$$\frac{\overline{U_0}}{\overline{u_0}} = CN'^3 \quad (8)$$

$$\frac{\overline{A_0}}{\overline{a_0}} = CN' \quad (9)$$

La ecuación (4) se modifica reemplazando  $a(t)$  con  $Ca(t)$  y  $N$  con  $N'$  como sigue (Aguirre *et al.*, 1994):

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N'x} \sum_{j=1}^{N'w} \left( \frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t - t_{ij}) * Ca(t) \quad (10)$$

$$F_{ij}(t - t_{ij}) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N'-1)n'} \delta \left[ t - t_{ij} - \frac{(K-1)\tau}{(N'-1)n'} \right] \quad (11)$$

En la figura 2 se presenta en forma esquemática el modelo de fuente finita aplicando el concepto del método de las funciones de Green empíricas. Se indica el sismo pequeño usado como función la de Green (semilla) y la aspereza utilizada para generar los sismos sintéticos, así como las características físicas y geométricas. A distancias cercanas a la fuente sísmica, la influencia de las dimensiones de la falla (conocida como “falla finita”) es importante.

Las características de la fuente sísmica como son el mecanismo focal, la directividad, la velocidad de ruptura, la profundidad, la irregular distribución de los desplazamientos sobre el plano de falla, las asperezas y su localización, son importantes para un adecuado modelado de la fuente sísmica. Desde el punto de vista sismológico, todos estos factores influyen de manera crucial para generar los patrones irregulares de velocidades y aceleraciones observados en sitios cercanos a las fallas sísmicas que generaron el movimiento. En el método de las funciones empíricas de Green, se involucran implícitamente incertidumbres como la relación entre caída de esfuerzos, del modelo de fuente, de la localización de las asperezas, de la localización del inicio de la ruptura de la falla, del tipo de propagación de la ruptura y de la velocidad de la ruptura.

## FUENTES SÍSMICAS ESTUDIADAS

Con el objetivo de tener una idea clara del peligro sísmico en la ciudad de Chilpancingo, se estudiaron cuatro fuentes sísmicas de subducción. El criterio para seleccionar las fuentes sísmicas fue la distancia al sitio (las más cercanas). Las simulaciones se realizaron para la estación RICC que se encuentra ubicada en suelo sedimentario (17.54° latitud Norte y 99.50° longitud Oeste) en el valle de Chilpancingo. Para la simulación se usó el método de las funciones de Green empíricas (Irikura, 1986). En la tabla 2 se presentan las características de los sismos utilizados como funciones de Green en este trabajo. Se incluye en la última columna la componente horizontal



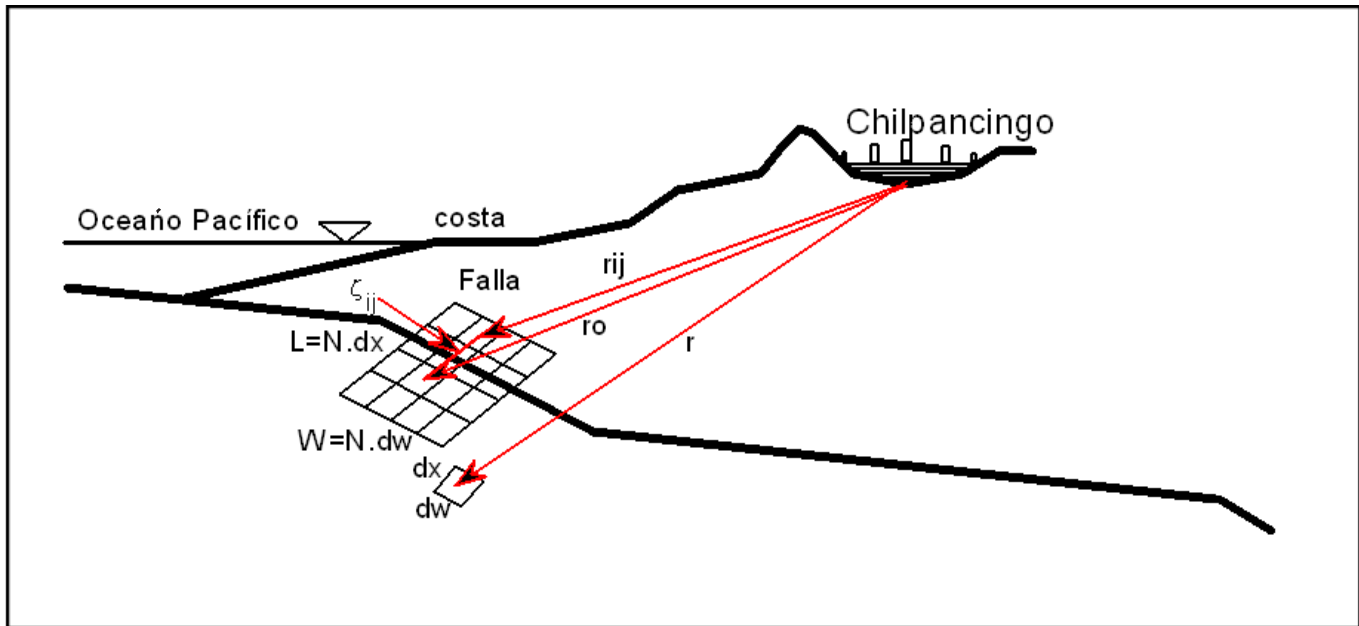


Figura 2. Modelo de falla finita usada en el método de las funciones de Green empíricas.

Tabla 2. Características de los sismos usados como función de Green (semilla) en las diferentes fuentes sísmicas para simular sismos sintéticos

| Fecha<br>d/m/a                                                                                                     | Hora<br>GMT | $M_w$ | Lat<br>N | Long<br>O | Prof<br>km | $M_0$<br>Dina-cm       | Acim | Ech | Áng<br>desliz | $CH_{m\acute{a}x}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|----------|-----------|------------|------------------------|------|-----|---------------|--------------------|
| <b>Fuente sísmica Ometepe (OM):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (Courboullex <i>et al.</i> 1997) |             |       |          |           |            |                        |      |     |               |                    |
| 16/00/1995                                                                                                         | 3:30:5.2    | 5.0   | 16.61°   | 98.54°    | 20.0       | $0.337 \times 10^{24}$ | 289° | 15° | 85°           | EO                 |
| <b>Fuente sísmica Acapulco-San Marcos (ASM):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (USGS)              |             |       |          |           |            |                        |      |     |               |                    |
| 29/10/1994                                                                                                         | 16:44:6     | 5.1   | 17.01°   | 99.68°    | 49.0       | $0.56 \times 10^{24}$  | 296° | 25° | 90°           | EO                 |
| <b>Fuente sísmica Guerrero Central (GC):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (CMT:Harvard)           |             |       |          |           |            |                        |      |     |               |                    |
| 13/04/2007                                                                                                         | 5:42:26.5   | 6.0   | 17.37°   | 100.14°   | 42.7       | $1.07 \times 10^{25}$  | 284° | 73° | 92°           | NS                 |
| <b>Fuente sísmica Petatlán (PE):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (CMT:Harvard)                   |             |       |          |           |            |                        |      |     |               |                    |
| 15/07/1996                                                                                                         | 21:23:42    | 6.6   | 17.50°   | 101.12°   | 22.4       | $9.95 \times 10^{25}$  | 297° | 21° | 93°           | EO                 |

usada en los sismos semilla para simular los sismos sintéticos, seleccionada de acuerdo al criterio de mayor aceleración.

Considerando la relación dada por Kanamori (1977) en la ecuación (12), se puede obtener el momento sísmico a partir de una magnitud dada. Dado que nos interesa obtener una simulación en un lugar (Chilpancingo) muy cercano a la fuente, la mayor contribución será de la aspereza más grande que ocurra en la falla.

Para obtener el área de la mayor aspereza se usa la relación de Somerville *et al.* (2002) para sismos de subducción reproducida en la ecuación (13)

$$M_w = \left( \frac{1}{1.5} \right) \log(M_0) - 10.73 \quad (12)$$

$$A_{asp} = 8.87 \times 10^{-16} (M_0)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

donde el área de la aspereza  $A_{asp}$  estará dada en  $\text{km}^2$  y  $M_0$  en dina-cm.

El método original utiliza los registros de sismos pequeños como funciones de Green empíricas que, mediante una superposición que obedece las leyes de escalamiento entre sismos, hace posible simular el registro del sismo grande. El tiempo en el cual ocurre la dislocación, es decir desde que una partícula inicia su movimiento hasta que se detiene, conocido como “rise time”, se obtiene con base en la fórmula propuesta por Somerville *et al.* (2002), para sismos de subducción, expresado por la ecuación (14).

$$T_R = 1.79 \times 10^{-9} (M_0)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

donde  $T_R$  es el “rise time” y  $M_0$  es el momento sísmico, en este caso del sismo pequeño. Se utilizó una velocidad de ruptura de  $V_r = 0.9 \times V_s$ . Observaciones recientes han mostrado que el lugar donde inicia la ruptura suele estar alejado de la posición de las asperezas. Somerville *et al.* (2002) proponen la ecuación (15) para estimar esa distancia.

$$R_A = 1.76 \times 10^{-8} (M_0)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

En la figura 3 se presenta la ubicación de las asperezas estudiadas proyectadas sobre el plano horizontal. Las superficies corresponden a la probable ocurrencia de un sismo máximo de  $M_w = 7.5$  para la fuente sísmica de Ometepec, de  $M_w = 7.7$  para Acapulco-San Marcos, de  $M_w = 8.2$  para Guerrero Central y de  $M_w = 7.4$  para Petatlán. Las dimensiones de 30x45 km, 55x40 km, 100x70 km y 37x30 km están de acuerdo con las asperezas máximas estimadas en los segmentos correspondientes a Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán, respectivamente, con excepción de Guerrero Central donde nunca se ha registrado un sismo de magnitud  $M_w = 8.2$ . La ubicación y tamaño de la aspereza de la fuente sísmica de Ometepec se obtuvo considerando el sismo del 14 de septiembre de 1995 (Courboulex *et al.*, 1997), la de Acapulco-San Marcos tomando en cuenta el sismo del 28 de julio de 1957 (Ortiz *et al.*, 2000), la de Guerrero Central considerando los sismos del 11 y 19 de mayo de 1962 (Ortiz *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2007), con un sismo probable de mayor magnitud en función del área de ruptura y del tiempo de quietud sísmica y finalmente para

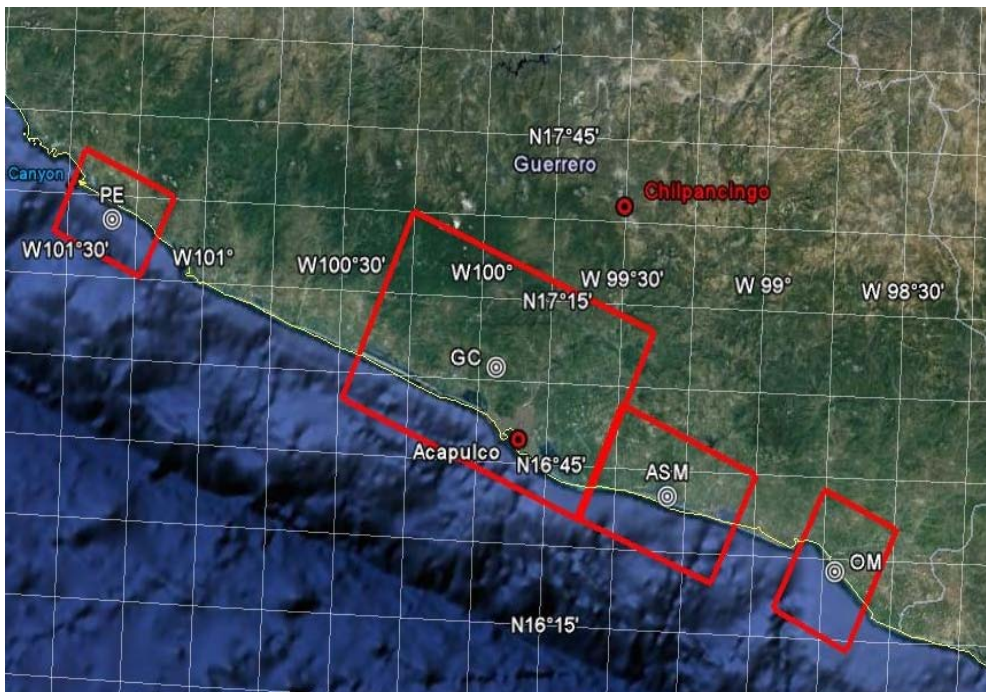


Figura 3. Asperezas utilizadas para simular acelerogramas sintéticos de las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán proyectadas sobre el plano horizontal.



Petatlán tomando en cuenta el sismo del 14 de marzo de 1979 (Anderson *et al.*, 1986).

En la figura 4 se presentan los modelos de falla finita de las asperezas de acuerdo al sismo máximo esperado en cada una de las fuentes sísmicas, para simular acelerogramas sintéticos. Los números o letras en las subfallas, indican los probables inicios de la ruptura en las diferentes fallas estudiadas, considerados en la simulación de sismos sintéticos.

Se propone una distribución exponencial para los sismos de magnitudes menores a  $M_w < 6.5$ , debido a que estos ocurren con mayor frecuencia, para los sismos de igual o mayor magnitud a  $M_w \geq 6.5$  su distribución está de acuerdo con el catálogo elaborado por Kostoglodov y Pacheco (1999), debido a que son menos frecuentes. La relación frecuencia-magnitud de los sismos de igual o mayor magnitud a  $M_w \geq 6.5$  se obtuvo

considerando los tiempos de recurrencia históricos ( $T_H$ ) presentados en la tabla 4, con excepción de la fuente sísmica Guerrero Central donde nunca se ha producido un sismo de  $M_w = 8.2$ . Una observación importante es que la mayoría de los catálogos son probablemente más completos para sismos de  $M_w \geq 6.5$  a partir de inicios del siglo anterior. Se aprecia en la figura 5, que los sismos de magnitudes grandes tienden a distribuirse como una curva normal, a medida que aumenta la cantidad de sismos registrados en la fuente y cuando disminuye la tendencia es a una distribución uniforme. Zúñiga y Wyss (2001) para el Oeste de Guerrero (entre longitudes  $100.5^\circ$ - $101.5^\circ$ ) encontraron valores altos de  $b$  y entre las longitudes  $100^\circ$ - $101^\circ$  así como al Oeste del segmento de Ometepec valores bajos de  $b$ . Ellos interpretan los valores bajos de  $b$  en los segmentos con regímenes de altos esfuerzos, que es como una aspereza, en la relación Gutenberg-Richter  $\log N = a - bM$ .

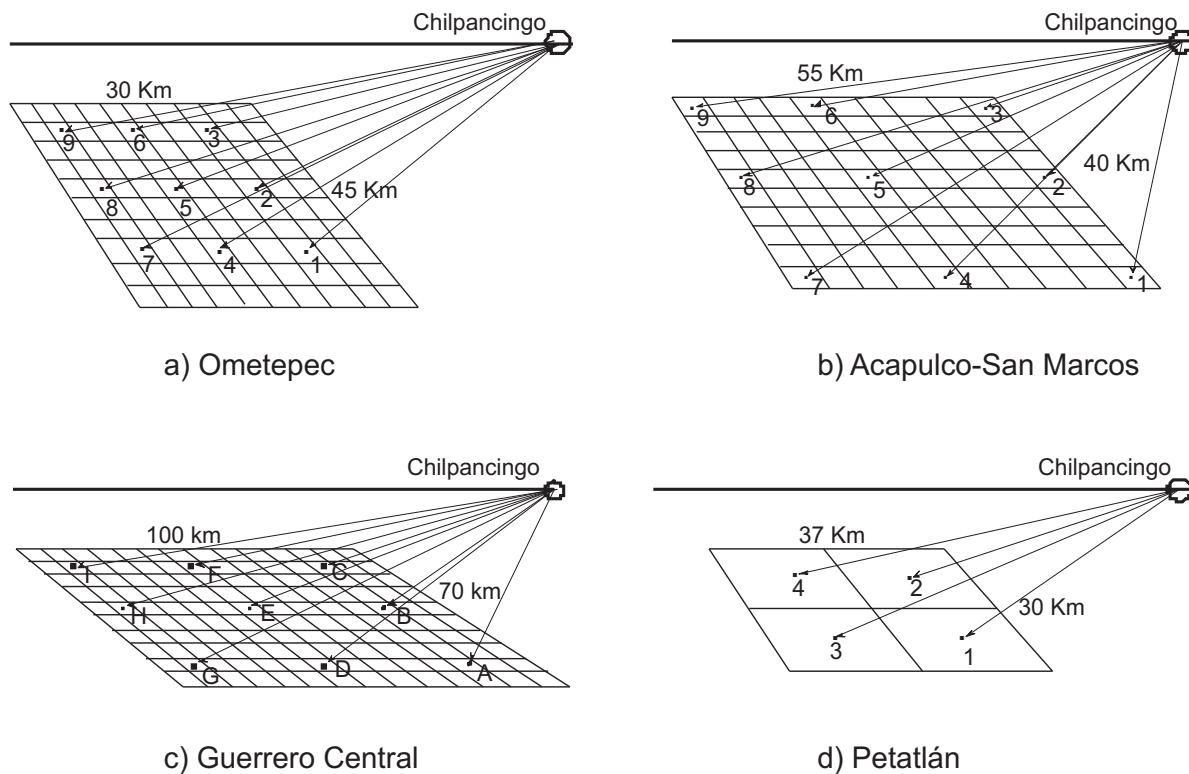


Figura 4. Modelos de falla finita para las diferentes fuentes sísmicas estudiadas de acuerdo al máximo sismo esperado en cada una de ellas. Los números o letras son probables inicios de ruptura.

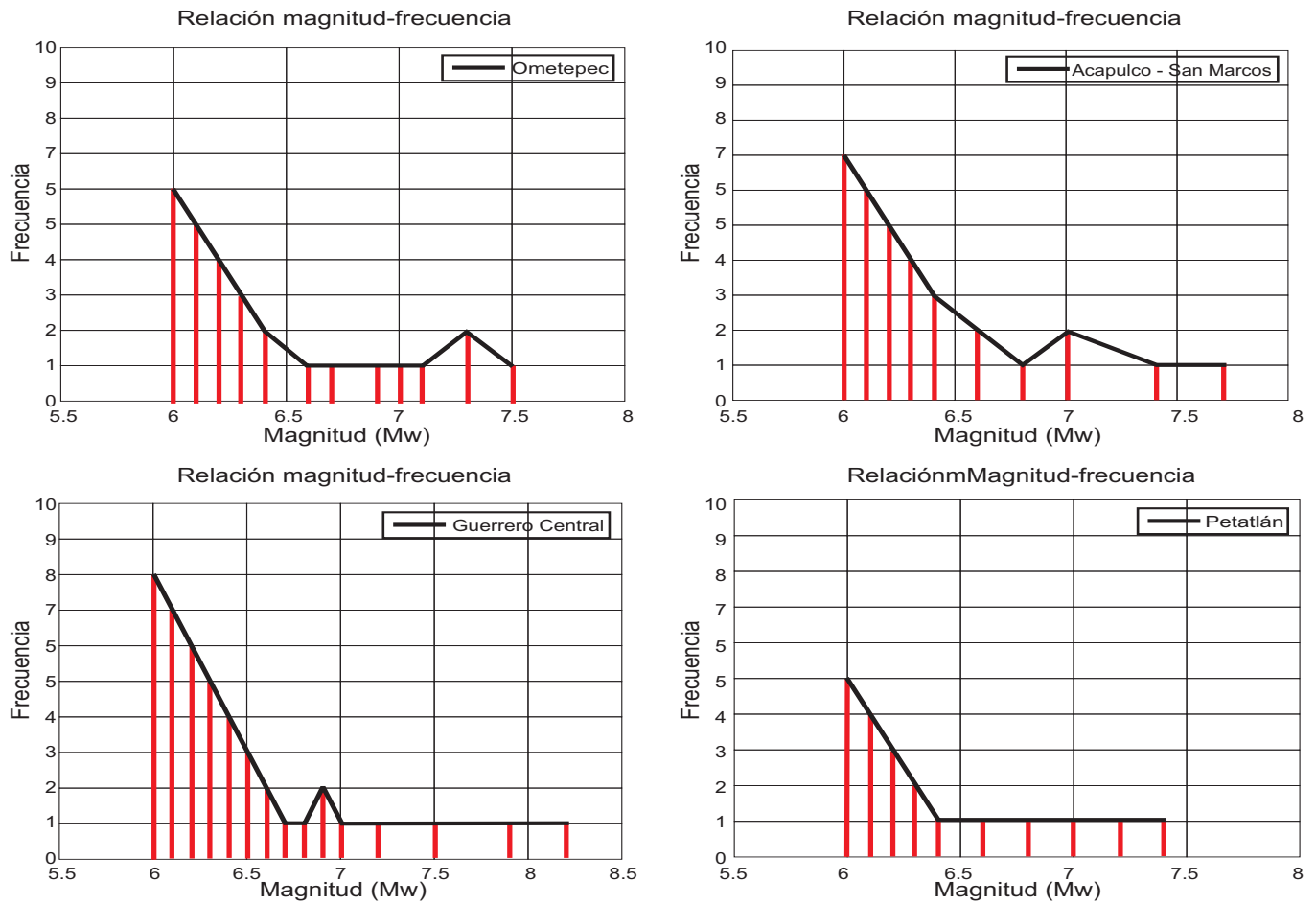


Figura 5. Relaciones magnitud-frecuencia consideradas para simular sismos sintéticos en las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

Para las costas de Guerrero el intervalo estimado de **b** se encontró entre 0.5 a 1.5, determinado con una base de datos obtenida del catalogo de sismicidad compilado por el SSN para el periodo de 1988 a 1998.

En la figura 6 se presenta la aceleración registrada con una PGA de 92.537 cm/s<sup>2</sup> componente NS y la sintética con una PGA de 96.246 cm/s<sup>2</sup> componente NS, del sismo del 13 de abril de 2007 con magnitud  $M_w=6.0$ , que como se puede observar tienen mucha similitud. En la misma figura 6 también se presentan los espectros de respuesta de Pseudo-Aceleración, en donde la única diferencia son las ordenadas espectrales

ligeramente mayores del espectro sintético. Para determinar los acelerogramas sintéticos se usó el programa de cómputo EGFMP, desarrollado por Irikura (1986), que también calcula la historia de velocidades y desplazamientos del sismo sintético, pero aquí solo se presentan las historias de aceleraciones. Es importante la calibración del método de acuerdo a las características de los sismos locales de subducción, ya que permite utilizarlo con más confianza. En este caso se presenta un sismo sintético simulado a una distancia epicentral de 80.0 km y a una profundidad de 23 km, que como ya se dijo anteriormente, tiene mucha similitud con el usado como semilla.

El objetivo principal es simular acelerogramas en la estación RICC (suelo sedimentario), debido a la ruptura de las diferentes asperezas estudiadas, con el propósito de determinar el peligro sísmico. Con este fin y de acuerdo a las relaciones magnitud-frecuencia de la figura 5, se simularon 28 sismos para la fuente sísmica de Ometepec, 32 para la de Acapulco-San Marcos, 44 para la de Guerrero Central y solo 5 para Petatlán, debido a la magnitud del sismo usado como semilla ( $M_w=6.6$ ), por lo que no fue posible simular sismos sintéticos en el intervalo de magnitudes de 6.0 a 6.5. Las principales características y PGA sintéticas, se presentan en la tabla 3. Como se puede observar de esta misma tabla 3, el criterio de selección en este caso de uno de los nueve sismos sintéticos simulados con magnitud  $M_w=8.2$  en la fuente sísmica Guerrero Central, consistió en considerar el valor promedio de PGA ( $1292.48 \text{ cm/s}^2$ ) de la falla y con inicio de ruptura en el punto E (centro de la aspereza) como se puede apreciar en la figura 7.

Como ejemplo en la figura 7, se presentan las aceleraciones sintéticas para un sismo con magnitud  $M_w=8.2$ , componente NS, obtenidas de la fuente sísmica Guerrero Central, para las nueve posiciones del inicio de la ruptura, ordenadas de acuerdo a la figura 4c, donde se puede apreciar el fuerte efecto de la directividad (ver figura 3) entre la fuente y el sitio (Chilpancingo). Se observa que las mayores PGA se presentaron para los inicios de ruptura G, I y H, con  $1754.546 \text{ cm/s}^2$ ,  $2154.549 \text{ cm/s}^2$  y  $2358.411 \text{ cm/s}^2$ , respectivamente.

### **ESPECTROS DE RESPUESTA SINTÉTICOS PARA SUELO SEDIMENTARIO (RICC)**

Con el propósito de observar la respuesta simulada en suelo sedimentario (estación RICC) de la ciudad de Chilpancingo, se seleccionaron 12 acelerogramas sintéticos de la fuente sísmica Ometepec, 11 de Acapulco-San Marcos, 15 de Guerrero Central y 5 de Petatlán de la tabla 3, considerando el criterio de usar el sismo

promedio de cada magnitud en cada una de las fuentes, con el objetivo de determinar sus espectros de respuesta de Seudo-Aceleración, correspondientes. Se incluyó el acelerograma registrado componente NS del sismo del 13/04/2007 con magnitud de  $M_w=6.0$ , en el caso de la fuente sísmica Guerrero Central. En la figura 8 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Ometepec, donde se observan amplificaciones importantes en alrededor de 0.50s de periodo, para esas magnitudes.

En la figura 9 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Acapulco-San Marcos, donde se observan amplificaciones importantes en una banda ancha de periodos en el intervalo de 0.12 hasta 3.0s, para esas magnitudes.

En el caso de la fuente sísmica Guerrero Central, se puede apreciar de los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico de la figura 10, amplificaciones significativas en alrededor de 0.32, 0.68 y 2.58 s de periodo, para esas magnitudes.

Finalmente, en la figura 11 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Petatlán, donde se observa que las mayores amplificaciones se presentan en alrededor de 0.40 y 0.82s de periodo, para esas magnitudes.

De acuerdo con los resultados anteriores, se puede concluir que, los sismos que se generen en Guerrero Central, con distancias epicentrales cercanas a 70 km y profundidades de alrededor de 25 km, pueden provocar algún tipo de daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo, que estén comprendidas en un intervalo de periodos estructurales entre 0.30 y 2.5s.

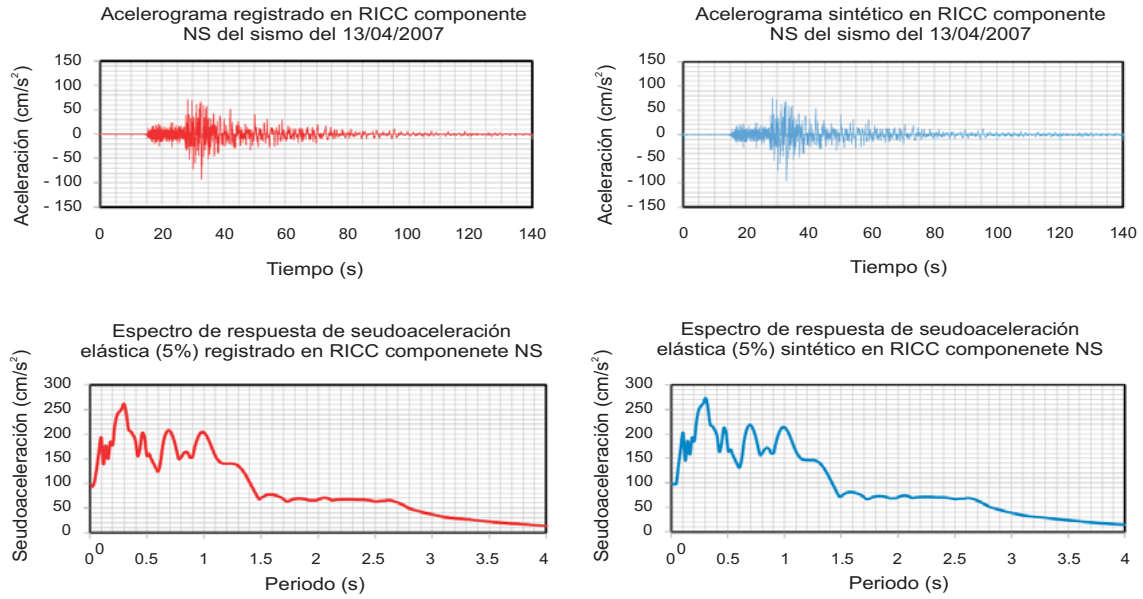


Figura 6. Arriba (izquierda) acelerograma registrado, arriba (derecha) acelerograma sintético, abajo (izquierda) espectro registrado y abajo (derecha) espectro sintético, para un sismo de  $M_w = 6.0$

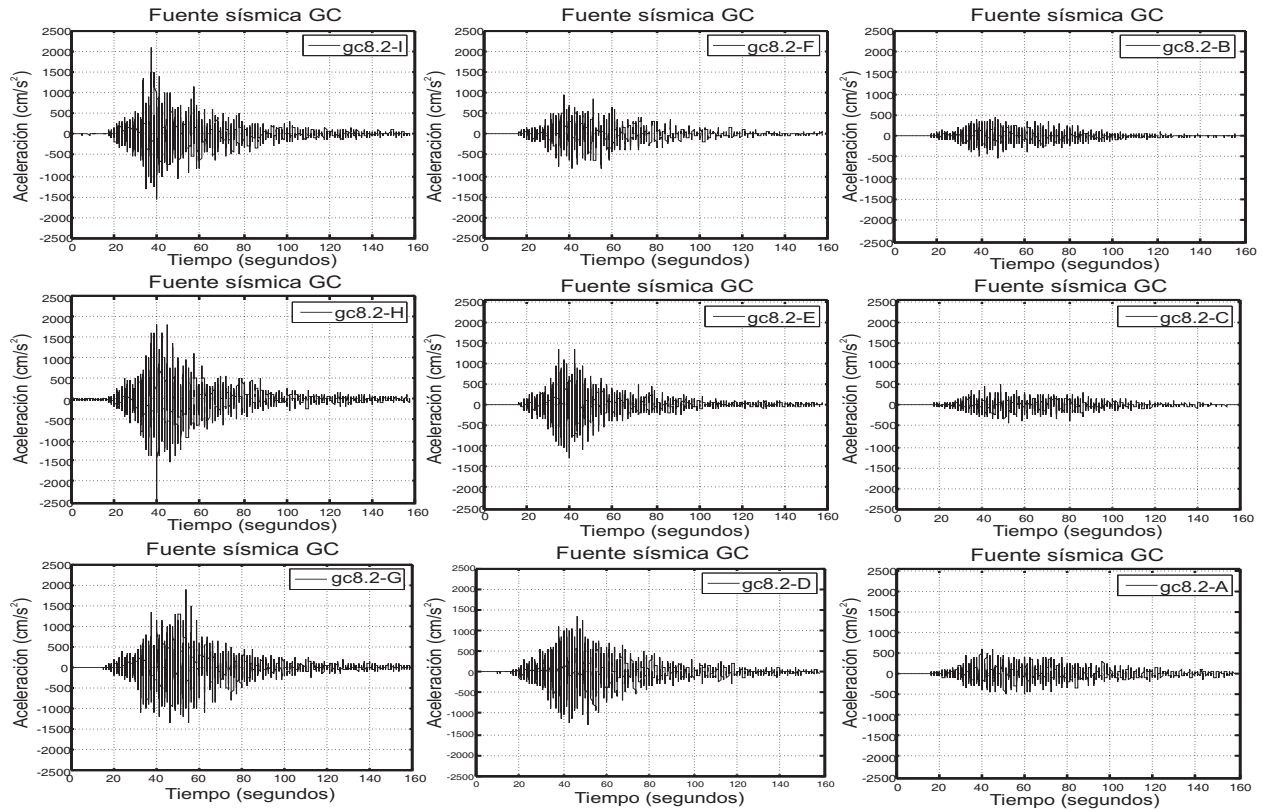


Figura 7. Aceleraciones sintéticas determinadas usando el método de las funciones de Green empíricas de la fuente sísmica Guerrero Central, para un sismo de magnitud  $M_w = 8.2$  (ver figura 4c).

Tabla 3. Datos de sismos sintéticos de las diferentes fuentes sísmicas y PGA estimadas

| Fuente sísmica Ometepec |                   |        |       |                  |
|-------------------------|-------------------|--------|-------|------------------|
| No.                     | Mag.              | Dist.  | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                         | (M <sub>w</sub> ) | (km)   | (km)  | (gals)           |
| 1                       | 7.5               | 139.10 | 26    | 122.377          |
| 2                       | 7.3               | 140.66 | 25    | 99.099           |
| 3                       | 7.3               | 134.04 | 25    | 101.251          |
| 4                       | 7.1               | 142.30 | 23.5  | 112.422          |
| 5                       | 7.0               | 143.27 | 22    | 133.155          |
| 6                       | 6.9               | 142.78 | 22.5  | 104.861          |
| 7                       | 6.7               | 143.76 | 21.5  | 62.125           |
| 8                       | 6.6               | 144.75 | 19    | 56.955           |
| 9                       | 6.4               | 145.26 | 21    | 47.107           |
| 10                      | 6.4               | 147.61 | 19    | 57.906           |
| 11                      | 6.3               | 144.75 | 21    | 46.902           |
| 12                      | 6.3               | 145.92 | 19    | 38.199           |
| 13                      | 6.3               | 151.01 | 19    | 51.023           |
| 14                      | 6.2               | 145.52 | 21    | 41.44            |
| 15                      | 6.2               | 146.40 | 19    | 35.944           |
| 16                      | 6.2               | 149.35 | 19    | 39.806           |
| 17                      | 6.2               | 149.55 | 20    | 45.901           |
| 18                      | 6.1               | 145.26 | 21    | 36.761           |
| 19                      | 6.1               | 142.96 | 22    | 35.25            |
| 20                      | 6.1               | 145.01 | 20    | 41.118           |
| 21                      | 6.1               | 145.55 | 22    | 41.355           |
| 22                      | 6.1               | 141.35 | 24    | 42.218           |
| 23                      | 6.0               | 146.03 | 20    | 31.234           |
| 24                      | 6.0               | 143.32 | 21    | 24.664           |
| 25                      | 6.0               | 144.60 | 20    | 29.561           |
| 26                      | 6.0               | 147.46 | 20    | 32.867           |
| 27                      | 6.0               | 143.53 | 23    | 35.686           |
| 28                      | 6.0               | 139.98 | 25    | 33.789           |

| Fuente sísmica Acapulco-San Marcos |                   |       |       |                  |
|------------------------------------|-------------------|-------|-------|------------------|
| No.                                | Mag.              | Dist. | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                                    | (M <sub>w</sub> ) | (km)  | (km)  | (gals)           |
| 29                                 | 7.7               | 97.44 | 18    | 160.152          |
| 30                                 | 7.4               | 97.44 | 18    | 113.439          |
| 31                                 | 7.2               | 97.44 | 18    | 90.113           |
| 32                                 | 7.0               | 97.44 | 18    | 79.905           |
| 33                                 | 6.8               | 97.44 | 18    | 69.717           |
| 34                                 | 6.6               | 97.44 | 18    | 54.521           |

| Fuente sísmica Acapulco-San Marcos |                   |        |       |                  |
|------------------------------------|-------------------|--------|-------|------------------|
| No.                                | Mag.              | Dist.  | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                                    | (M <sub>w</sub> ) | (km)   | (km)  | (gals)           |
| 35                                 | 6.6               | 99.27  | 18    | 60.596           |
| 36                                 | 6.4               | 97.44  | 18    | 36.918           |
| 37                                 | 6.4               | 99.32  | 17    | 34.378           |
| 38                                 | 6.4               | 100.99 | 17    | 41.604           |
| 39                                 | 6.3               | 97.44  | 18    | 36.572           |
| 40                                 | 6.3               | 100.65 | 17    | 35.381           |
| 41                                 | 6.3               | 99.01  | 18    | 44.37            |
| 42                                 | 6.3               | 94.26  | 19    | 34.863           |
| 43                                 | 6.2               | 97.44  | 18    | 23.172           |
| 44                                 | 6.2               | 97.46  | 19    | 26.944           |
| 45                                 | 6.2               | 99.34  | 18    | 30.918           |
| 46                                 | 6.2               | 93.66  | 19    | 28.538           |
| 47                                 | 6.2               | 97.44  | 18    | 21.538           |
| 48                                 | 6.1               | 97.44  | 18    | 22.87            |
| 49                                 | 6.1               | 94.12  | 19    | 24.175           |
| 50                                 | 6.1               | 94.15  | 20    | 26.035           |
| 51                                 | 6.1               | 99.15  | 18    | 29.499           |
| 52                                 | 6.1               | 94.12  | 19    | 27.347           |
| 53                                 | 6.1               | 97.44  | 18    | 20.864           |
| 54                                 | 6.0               | 97.44  | 18    | 24.855           |
| 55                                 | 6.0               | 97.67  | 17    | 20.599           |
| 56                                 | 6.0               | 95.98  | 18    | 25.274           |
| 57                                 | 6.0               | 95.79  | 19    | 21.744           |
| 58                                 | 6.0               | 99.11  | 17    | 23.361           |
| 59                                 | 6.0               | 94.30  | 19    | 27.720           |
| 60                                 | 6.0               | 92.64  | 20    | 29.006           |

| Fuente sísmica Guerrero Central |                   |       |       |                  |
|---------------------------------|-------------------|-------|-------|------------------|
| No.                             | Mag.              | Dist. | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                                 | (M <sub>w</sub> ) | (km)  | (km)  | (gals)           |
| 61                              | 8.2               | 72.00 | 24.0  | 1292.48          |
| 62                              | 7.9               | 72.50 | 25.0  | 905.11           |
| 63                              | 7.5               | 72.50 | 25.0  | 650.90           |
| 64                              | 7.2               | 76.42 | 24.0  | 432.97           |
| 65                              | 7.0               | 79.44 | 23.0  | 289.08           |
| 66                              | 6.9               | 77.85 | 23.0  | 278.09           |



| Fuente sísmica Guerrero Central |                   |       |       |                  |
|---------------------------------|-------------------|-------|-------|------------------|
| No.                             | Mag.              | Dist. | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                                 | (M <sub>w</sub> ) | (km)  | (km)  | (gals)           |
| 67                              | 6.9               | 67.90 | 27.0  | 300.43           |
| 68                              | 6.8               | 69.82 | 27.0  | 289.69           |
| 69                              | 6.7               | 73.06 | 25.0  | 211.63           |
| 70                              | 6.6               | 72.50 | 25.0  | 203.06           |
| 71                              | 6.6               | 67.50 | 27.5  | 186.14           |
| 72                              | 6.5               | 72.84 | 25.0  | 184.79           |
| 73                              | 6.5               | 67.86 | 27.5  | 200.83           |
| 74                              | 6.5               | 72.50 | 25.0  | 209.18           |
| 75                              | 6.4               | 67.78 | 27.5  | 201.76           |
| 76                              | 6.4               | 72.75 | 25.0  | 219.81           |
| 77                              | 6.4               | 67.50 | 27.5  | 204.73           |
| 78                              | 6.4               | 72.50 | 25.0  | 168.90           |
| 79                              | 6.3               | 76.00 | 24.5  | 100.33           |
| 80                              | 6.3               | 68.50 | 27.5  | 108.54           |
| 81                              | 6.3               | 61.50 | 30.0  | 117.08           |
| 82                              | 6.3               | 53.50 | 32.5  | 127.98           |
| 83                              | 6.3               | 46.50 | 35.5  | 136.95           |
| 84                              | 6.2               | 78.00 | 24.0  | 98.17            |
| 85                              | 6.2               | 71.50 | 26.5  | 105.07           |
| 86                              | 6.2               | 65.00 | 28.5  | 112.88           |
| 87                              | 6.2               | 58.50 | 31.0  | 121.01           |
| 88                              | 6.2               | 52.00 | 33.5  | 129.52           |
| 89                              | 6.2               | 45.00 | 36.0  | 139.02           |
| 90                              | 6.1               | 80.50 | 23.0  | 95.69            |
| 91                              | 6.1               | 74.50 | 25.0  | 101.95           |
| 92                              | 6.1               | 69.50 | 27.0  | 107.45           |
| 93                              | 6.1               | 64.00 | 29.0  | 114.02           |
| 94                              | 6.1               | 59.00 | 31.0  | 120.21           |
| 95                              | 6.1               | 53.50 | 33.0  | 127.45           |
| 96                              | 6.1               | 47.50 | 35.0  | 135.48           |
| 97                              | 6.0               | 84.00 | 21.0  | 92.53            |
| 98                              | 6.0               | 80.00 | 23.0  | 96.25            |
| 99                              | 6.0               | 75.00 | 25.0  | 101.34           |
| 100                             | 6.0               | 70.00 | 27.0  | 106.78           |
| 101                             | 6.0               | 65.50 | 28.0  | 112.47           |
| 102                             | 6.0               | 61.50 | 30.0  | 117.08           |
| 103                             | 6.0               | 56.50 | 32.0  | 123.38           |
| 104                             | 6.0               | 51.50 | 34.0  | 129.82           |

| Fuente sísmica Petatlán |                   |        |       |                  |
|-------------------------|-------------------|--------|-------|------------------|
| No.                     | Mag.              | Dist.  | Prof. | PGA <sub>H</sub> |
|                         | (M <sub>w</sub> ) | (km)   | (km)  | (gals)           |
| 105                     | 7.4               | 188.22 | 24    | 56.35            |
| 106                     | 7.2               | 193.83 | 18    | 45.264           |
| 107                     | 7.0               | 204.85 | 18    | 39.718           |
| 108                     | 6.8               | 203.00 | 18    | 40.444           |
| 109                     | 6.6               | 193.02 | 19    | 41.295           |

## CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO PARA SUELO SEDIMENTARIO (RICC)

En la tabla 4 se presentan los tiempos de recurrencia local,  $T_L$ , obtenidos de Zúñiga y Wyss (2001) y los tiempos de recurrencia históricos estimados,  $T_H$ , para las diferentes fuentes sísmicas (Nishenko y Singh, 1987) para la ocurrencia de un sismo característico. Los tiempos de recurrencia históricos, fueron estimados con base en probabilidades condicionadas para la recurrencia de grande y gran sismo interplaca a lo largo de la zona de subducción de la costa del Pacífico Mexicano. Los tiempos de recurrencia local fueron estimados con base en las localizaciones más o menos probables de grande a gran sismo a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, estimados de tiempos de recurrencia local basados en valores-b. En todos los casos rigen los tiempos de recurrencia históricos.

Usando la relación de magnitud de momento sísmico,  $M_w$  y el momento sísmico,  $M_0$ , de Kanamori (1977) dada en la ecuación (12) y la relación empírica entre el periodo de retorno,  $T_r$  y el momento sísmico,  $M_0$ , de Astiz y Kanamori (1984) expresada en la ecuación (16), se pueden calcular los parámetros, como el momento sísmico, el periodo de retorno  $T_r$  y la tasa media de excedencia de la magnitud  $\lambda(M)$  que es igual al inverso del periodo de retorno. Se consideraron intervalos de magnitudes de  $6.0 \leq M_w \leq 7.5$ , de  $6.0 \leq M_w \leq 7.7$ ,  $6.0 \leq M_w \leq 8.2$  y de  $6.0 \leq M_w \leq 7.4$ , para

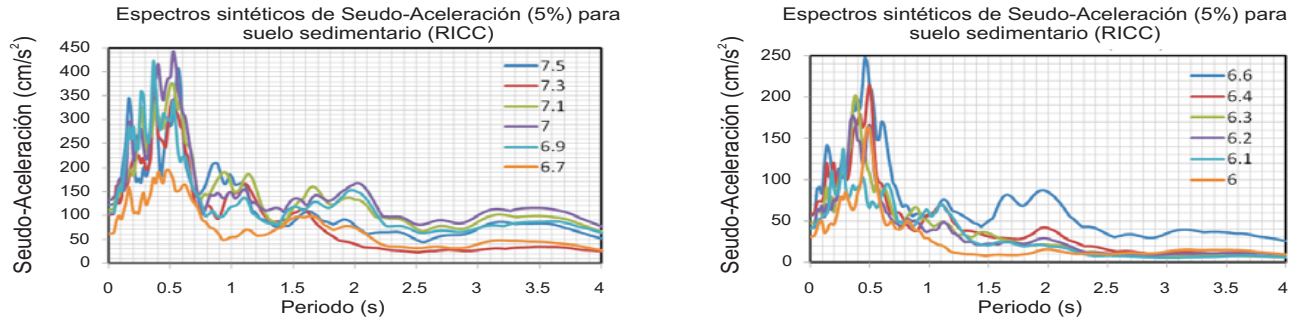


Figura 8. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Ometepec.

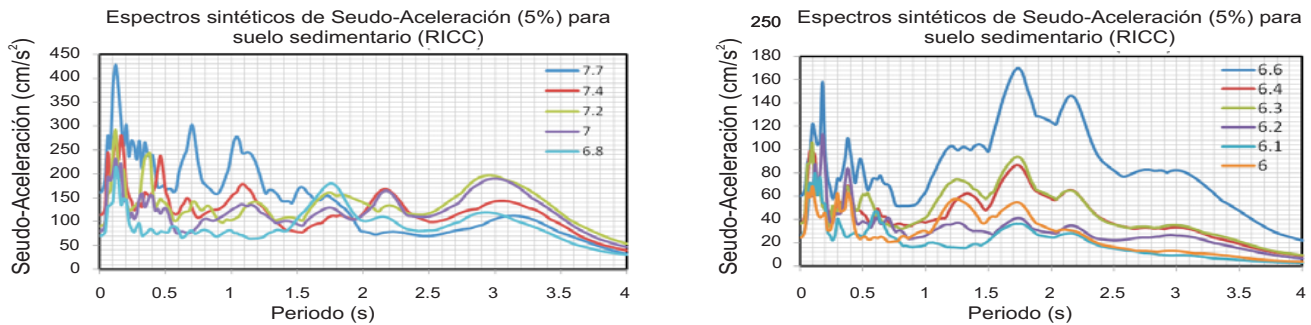


Figura 9. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Acapulco-San Marcos.

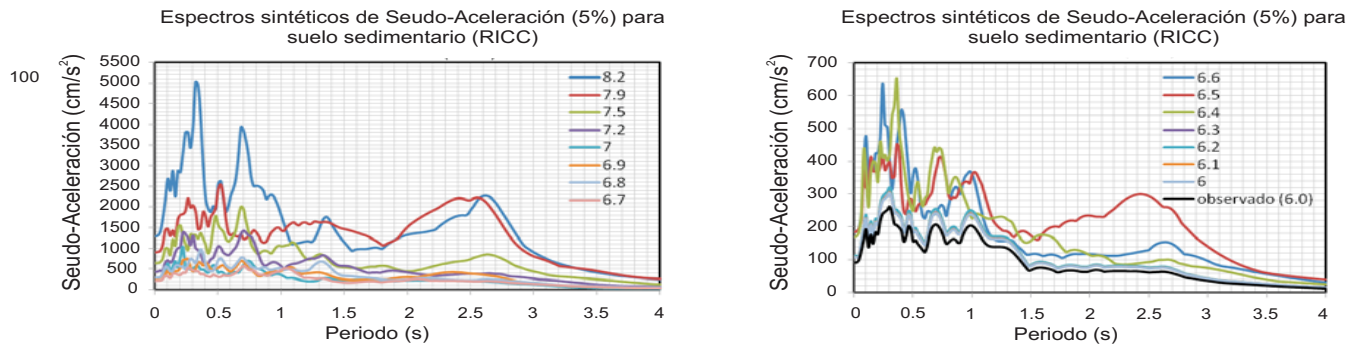


Figura 10. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Guerrero Central.

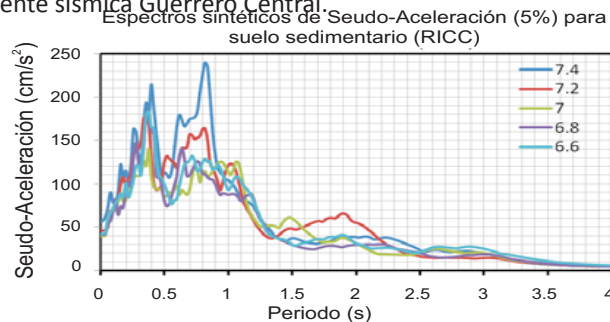


Figura 11. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Petatlán.

Tabla 4. Tiempos de recurrencia local e históricos de las diferentes fuentes sísmicas

| Fuente sísmica            | Longitudes      | T <sub>L</sub> (años) | T <sub>H</sub> (años) |
|---------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Ometepec (OM)             | 98° a 99° O     | 30                    | <b>36</b>             |
| Acapulco-San Marcos (ASM) | 99° a 100° O    | 30                    | <b>56</b>             |
| Guerrero Central (GC)     | 100° a 101.2° O | 50                    | <b>98</b>             |
| Petatlán (PE)             | 101° a 101.8° O | 20                    | <b>36</b>             |

las fuentes sísmicas de Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán, respectivamente. En la figura 12, se presentan las relaciones  $M-\lambda(M)$  que caracterizan el potencial y actividad (sismicidad) de las fuentes sísmicas estudiadas. Se observa un comportamiento muy similar de la tasa media de excedencia de la magnitud para las diferentes fuentes sísmicas estudiadas. La diferencia más significativa es el tiempo de recurrencia de sus sismos característicos donde, el de Guerrero Central es el más grande y el de Petatlán el más corto.

$$\text{Log}T_r = \left(\frac{1}{3}\right)\log(M_0) - 7.5 \quad (16)$$

En la figura 13 se presentan las curvas de peligro sísmico para suelo sedimentario de Chilpancingo, obtenidas a través de acelerogramas (PGA) sintéticos de las fuentes, sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán. Estas curvas expresan la tasa de excedencia de la aceleración horizontal máxima del terreno; el inverso de  $\lambda(\text{PGA})$  indica el periodo de retorno para el cual puede excederse cierto nivel de PGA. Se observa que Guerrero Central, representa el más alto peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo, pues se observa que para un periodo de retorno de alrededor de 100 años, las aceleraciones horizontales máximas del terreno pueden exceder de 1000 cm/s<sup>2</sup>.

### COMPARACIÓN CON EL ENFOQUE CLÁSICO

Con el objetivo de tener una idea más completa del peligro sísmico en suelo sedimentario (RICC) de la ciudad de Chilpancingo, se determinó el

movimiento fuerte esperado del terreno con un modelo de atenuación, utilizando la base de datos de la tabla 3 (sismos sintéticos), con datos únicamente de la fuente sísmica Guerrero Central. Se realizó la regresión utilizando el funcional de la ecuación 17, el cual no incluye efecto de sitio y considera solamente el mecanismo de falla inversa (sismo de subducción). Con la ecuación 18 se obtuvo la relación de atenuación para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$ , la cual se presenta en la figura 14, donde se aprecia variación de la aceleración horizontal máxima (PGA) con la distancia hipocentral.

$$\ln(\text{PGA}) = C_1 + C_2 M_w + C_3 \ln(R) \quad (17)$$

$$\ln(\text{PGA}) = -0.322 + 1.198 M_w - 0.527 \ln(R) \quad (18)$$

Posteriormente, utilizando nuevamente el funcional de la ecuación 17 para la regresión, pero ahora considerando los datos de todas las fuentes sísmicas presentadas en la tabla 3, se obtuvo el funcional de la ecuación 19 con el que se determinó la relación de atenuación sintética para una magnitud de  $M_w=8.2$ , la cual se presenta en la misma figura 14. La relación de atenuación con sismos observados se determinó con una base de datos de 22 sismos registrados en las estaciones CHI1 y RICC (suelo sedimentario), con magnitudes  $M_w$  entre 5.0 y 8.1 y distancias epicentrales entre 47.0 y 653.3 km. En la ecuación 20 se presenta el funcional usado en la regresión correspondiente y en la ecuación 21 el obtenido para determinar la relación de atenuación para una magnitud de  $M_w=8.2$ .

$$\ln(\text{PGA}) = 4.331 + 1.206 M_w - 1.692 \ln(R) \quad (19)$$

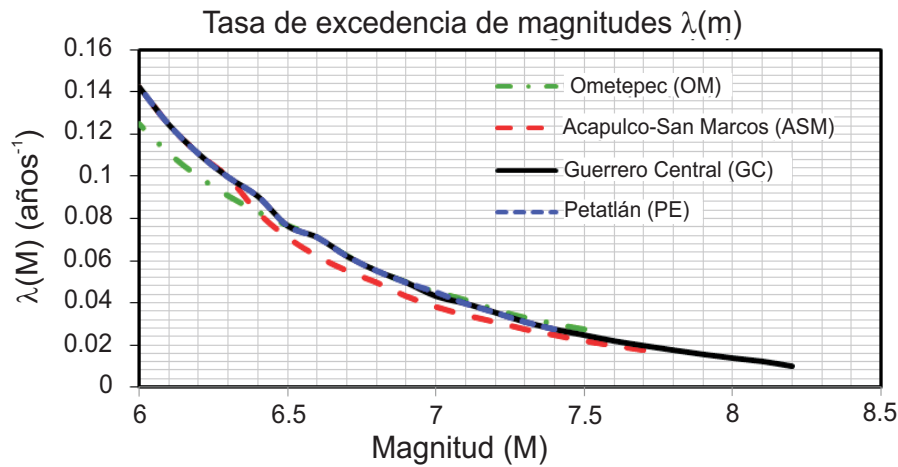


Figura 12. Tasa de excedencia de magnitudes  $\lambda(M)$  para las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

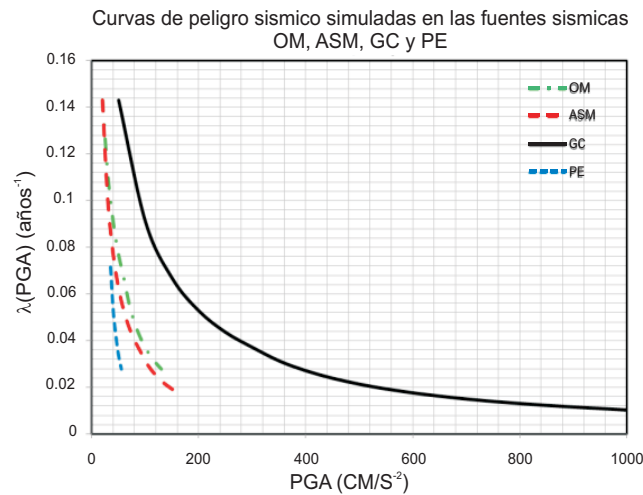


Figura 13. Curvas de peligro sísmico para suelo sedimentario de Chilpancingo, simuladas en las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

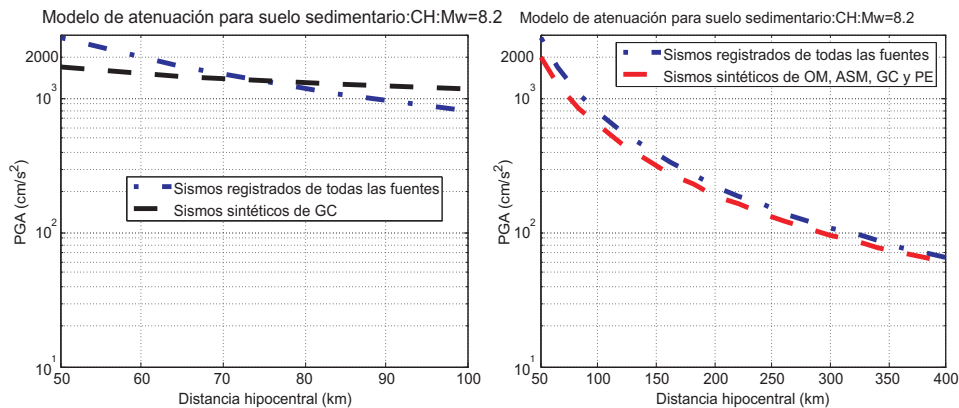


Figura 14. Comparativa entre relaciones de atenuación de sismos registrados de todas las fuentes con sintéticos de Guerrero Central (izquierda) y registrados de todas las fuentes con sintéticos de todas las fuentes (derecha).

$$\ln(PGA)=C_1+C_2M_w+C_3\ln(R)+C_4S_1 \quad (20)$$

$$\ln(PGA)=-1.56+1.45M_w-1.8\ln(R)-2.216 \quad (21)$$

Al comparar en la figura 14 la relación de atenuación obtenida con sismos sintéticos (enfoque Neo-Determinista) de la fuente Guerrero Central con la determinada con sismos registrados (enfoque Determinista) de todas las fuentes sísmicas, se observa que para una distancia hipocentral de 90 km la aceleración horizontal máxima del terreno para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  resulta de 1249.577 cm/s<sup>2</sup> y 957.528 cm/s<sup>2</sup>, respectivamente, lo cual representa una diferencia significativa. Lo más adecuado es determinar una relación de atenuación para cada fuente, pero en el caso Determinista no se contó con suficientes datos de cada fuente sísmica. Al comparar en la figura 14 la relación de atenuación obtenida con sismos sintéticos de todas las fuentes con la determinada con sismos registrados de todas las fuentes, se encontró que para una distancia hipocentral de 90 km la aceleración horizontal máxima del terreno para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  resulta de 744.23 cm/s<sup>2</sup> y 957.528 cm/s<sup>2</sup>, respectivamente.

En general se observan mayores aceleraciones máximas del terreno para la misma distancia hipocentral en la relación de atenuación determinada con sismos registrados (enfoque Determinista) de todas las fuentes que de la obtenida con sismos sintéticos (enfoque Neo-Determinista) de todas las fuentes. También se observa una diferencia muy significativa entre la relación de atenuación determinada con sismos sintéticos de la fuente Guerrero Central, comparada con la obtenida usando sismos sintéticos de todas las fuentes (OM, ASM, GC y PE), pero como ya se dijo lo más adecuado es considerar el estudio individual de cada fuente sísmica. Es importante recordar que el método de las funciones de Green empíricas considera una fuente finita, donde puede variar el inicio de

la ruptura dentro de la aspereza. Aun así, resulta muy interesante esta comparación.

## ESPECTRO SINTÉTICO DE SITIO (RICC)

Las ordenadas espectrales máximas de los sismos sintéticos de todas las fuentes sísmicas calculadas (figuras 8 a 11), con excepción de la fuente sísmica Guerrero Central, son cubiertas por el espectro de diseño sísmico del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero. Por tanto, la fuente sísmica Guerrero Central resultó ser el escenario de mayor peligro sísmico para el valle de Chilpancingo, y los sismos sintéticos de la tabla 3 correspondientes a esta fuente, son considerados para estimar espectros sintético de sitio (RICC).

En la figura 15 se presentan cuatro espectros sintéticos de sitio estimados considerando los sismos sintéticos en el intervalo de las magnitudes estudiadas de la fuente sísmica Guerrero Central (tabla 3). Cada espectro se definió de acuerdo al criterio de Newmark y Hall (1973), que considera que para una proporción de amortiguamiento estructural del 5%, el factor de amplificación para la aceleración máxima del terreno es 2.6, considerando dos periodos característicos según los espectros de respuesta. Se consideró conveniente proponer la aceleración máxima del terreno para cada uno de los cuatro espectros de acuerdo al promedio de las aceleraciones máximas de los sismos sintéticos con magnitud 7.9, 7.5, 7.0 y 6.5, respectivamente. Cada una de estas magnitudes representa la magnitud promedio al considerar cuatro niveles de ocurrencia. Estos niveles se definieron para representar los eventos "muy raro", "raro", "ocasional" y "frecuente". La nomenclatura adoptada en este trabajo para estos cuatro niveles es la usada por VISION 2000 (1996).

En la misma figura 15 se presenta una comparativa entre los espectros sintéticos de sitio y el

espectro de diseño para edificaciones clasificadas como del grupo B que exige el Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero, para la zona sísmica D (ciudad de Chilpancingo), para terreno tipo II (Depósitos aluviales). En el primero de los espectros se observa que la zona plana propuesta del espectro no cubre totalmente la ordenada máxima de  $2548.99 \text{ cm/s}^2$  que se presenta para un periodo de 0.52 s del sismo sintético con magnitud 7.9, la cual puede cubrirse con la sobre-resistencia de las estructuras. Los periodos característicos del espectro sintético de sitio estimado, están perfectamente definidos entre 0.5 y 2.5 s. Aquí se observa que la zona plana del espectro sintético de sitio estimado del sismo considerado como muy raro, es mucho mayor comparada con lo que exige el Reglamento de Construcción vigente. Los límites de los periodos característicos del

espectro sintético de sitio estimado para el sismo muy raro cubren periodos más largos y por tanto, una zona plana del espectro mayor.

En la tabla 5 se presentan los principales parámetros que definen los espectros sintéticos de sitio estimado (RICC) y el que exige el Reglamento de Construcción en vigor.

Se puede concluir, que el enfoque Neo-Determinista tiene una gran ventaja sobre el enfoque probabilista por dos razones principalmente: la primera porque evalúa de manera más realista el peligro sísmico en una región (o sitio) y la segunda porque se pueden utilizar directamente los acelerogramas sintéticos para diseñar estructuras típicas o megaestructuras así como revisar la vulnerabilidad de las existentes, lo cual no es posible con el enfoque tradicional.

Tabla 5. Valores de los parámetros para calcular los espectros

| Zona                                                                                           | c    | $a_0$ | $T_a$ (s) | $T_b$ (s) | r    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-----------|-----------|------|
| Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo muy Raro ( $M_w=7.9$ )                               |      |       |           |           |      |
| II (Depósitos aluviales)                                                                       | 2.20 | 0.86  | 0.50      | 2.50      | 1.33 |
| Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Raro ( $M_w=7.5$ )                                   |      |       |           |           |      |
| II (Depósitos aluviales)                                                                       | 1.72 | 0.66  | 0.50      | 1.50      | 1.33 |
| Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Ocasional ( $M_w=7.0$ )                              |      |       |           |           |      |
| II (Depósitos aluviales)                                                                       | 0.78 | 0.30  | 0.30      | 1.50      | 1.33 |
| Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Frecuente ( $M_w=6.5$ )                              |      |       |           |           |      |
| II (Depósitos aluviales)                                                                       | 0.47 | 0.18  | 0.30      | 1.50      | 1.33 |
| Espectro para diseño del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero |      |       |           |           |      |
| II (Depósitos aluviales)                                                                       | 0.86 | -     | -         | 1.2       | 0.66 |



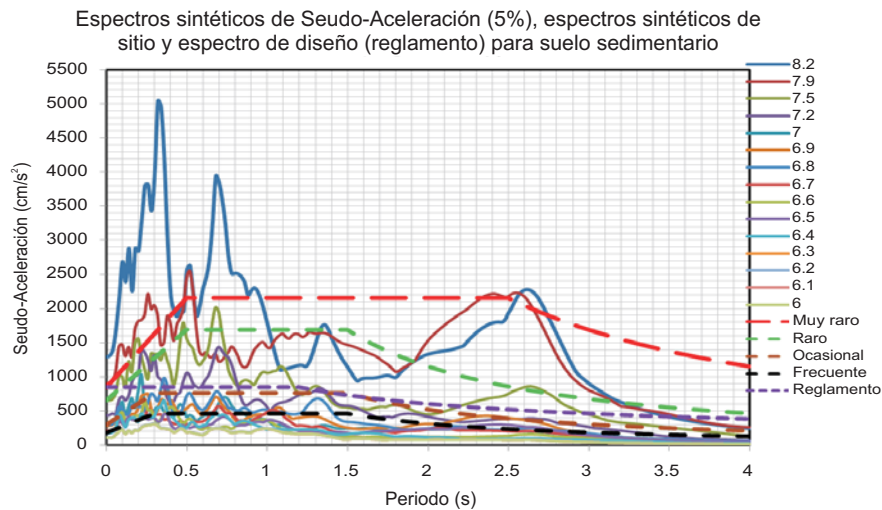


Figura 15. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico, espectros sintéticos de sitio y espectro de diseño del Reglamento de Construcción, para suelo sedimentario.

## CONCLUSIONES

Al no contar con registros de sismos intensos de las fuentes sísmicas Guerrero Central y Acapulco San Marcos, es decir, las más cercanas al sitio (menos de 100 km de Chilpancingo), se decidió aplicar el método de las funciones de Green empíricas, con el objetivo de generar sismos sintéticos. Se encontró que la fuente sísmica de Guerrero Central produce el mayor peligro sísmico para Chilpancingo, de acuerdo a los resultados, debido a la magnitud de  $M_w=8.2$  considerada como sismo máximo probable para este segmento y también a la cercanía de la aspereza al sitio, así como también al fuerte efecto de la directividad. El escenario sísmico más crítico lo representa la fuente sísmica de Guerrero Central que incluye una aceleración horizontal máxima del terreno de  $2358 \text{ cm/s}^2$ .

Aunque el enfoque utilizado en este estudio no es muy frecuente para valorar el peligro sísmico en un sitio, es una herramienta útil, no sólo porque permite considerar el peor escenario sísmico, sino porque sus resultados son acelerogramas, con los que se puede analizar de manera directa el comportamiento estructural de las diferentes

construcciones ubicadas en el lugar. De los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico, se observa que los sismos que se pueden producir en Guerrero Central, con epicentros cercanos a 70 km y a profundidades alrededor de 25 km, pueden provocar daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo con periodos estructurales comprendidos en el intervalo de 0.30 a 2.5s.

Las curvas de peligro sísmico obtenidas para el suelo sedimentario (RICC) de Chilpancingo, que expresan la tasa de excedencia de la PGA horizontal y su inverso, el periodo de retorno para el cual se excede cierto nivel de PGA, son muy importantes para decidir el nivel de aceleración con el que se debe diseñar una estructura. Para fines de diseño estructural destaca la curva de peligro sísmico obtenida a través de la fuente sísmica Guerrero Central, pues se observa que para un periodo de retorno de alrededor de 100 años, las aceleraciones horizontales máximas del terreno se pueden exceder de  $1000 \text{ cm/s}^2$ . Para propósitos de diseño estructural, se recomienda utilizar este enfoque de peligro sísmico en los Reglamentos de Construcción. Su

aplicación conduciría a diseños más realistas y confiables, así como a evaluaciones estructurales de construcciones existentes.

A través de sus relaciones de atenuación se realizó una comparación entre los resultados del enfoque Determinista y Neo-Determinista. Se encontró en general una correlación razonable que robustece el enfoque Neo-Determinista. Finalmente, Los resultados de este trabajo respaldan la tesis de que el enfoque Neo-Determinista es adecuado para la valoración del peligro sísmico. Existen aún variables y detalles no explorados en este trabajo, que sería conveniente estudiar.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los árbitros, por su revisión y comentarios que sirvieron para mejorar el trabajo. También se agradece al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por todas las facilidades otorgadas para la realización del trabajo.

## REFERENCIAS

Aguirre, J., Irikura K. y Kudo K., 1994. Estimation of strong ground motion on hard rock and soft sediments sites in the AshigaraValley using the empirical Green's function method. *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, KyotoUniversity*, Vol. 44, part 1, No 379, pp. 45-64.

Anderson, J. G., Bodin P., Brune J. N., Prince J., Singh S. K., Quaas R. y Onate M., 1986. Strong Ground Motion from the Michoacan, Mexico, Earthquake. *Articles, Science*, Vol. 233.

Aki, K., 1967. Scaling law of seismic spectra. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, pp. 5359-5376.

Asano, K., T. Iwata, y K. Irikura, 2005. Estimation of source process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, 1701-1715.

Asano, Kimiyiki, y Tomotaka Iwata, 2006. Source process and near-source ground motions of the 2005 West off Fukuoka Prefecture earthquake. *Earth Planets Space*, Vol. 58, 93-98.

Astiz, L. y Kanamori H., 1984. An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, México. *Physics of the Earth and Planet Interiors* 34, pp. 24-25.

Centroid Moment Tensor (CMT:Harvard) Catalogo, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Courboux, F., *et al.*, 1997. The 14 September 1995 (M=7.3) Copala, Mexico, Earthquake: A Source Study Teleseismic, Regional, and Local Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 4, pp. 999-1010.

Hartzell, S. H., 1978. Earthquake aftershock as Gree's function. *Geophysic Research Letter*, Vol. 5, pp. 1-4.

Irikura, K., 1983. Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquake. *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 33, Part 2, No. 298.

Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's funtion. *Proc. 7th Japan Earthquake Eng. Symp.*, pp. 151-156 (en japonés).

- Kamae, K., K. Irikura, 1998. Rupture process of the 1995 Hyogo-ken-Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, pp. 400-412.
- Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes. *Journal Geophysical Research*, Vol. 82, pp. 2981-2987.
- Kostoglodov, V. y Pacheco J. F., 1999. Cien años de sismicidad en México. Instituto de Geofísica de la UNAM y Servicio Sismológico Nacional.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006a. Procedure for the evaluation of damaging effects of earthquakes. IAEA Specialist meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea. OECD.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006b. A Procedure for Probabilistic Scenario-Based Seismic Risk Analysis for Critical Infrastructures-Method and Application for a Nuclear Power Plant. Poster GC41B-1054, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 11-15.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006c. Lesson learned from seismic PSA Level 1 and Level 2 at NPP Goesgen. IAEA Specialist meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea. OECD.
- Klügel, Jens-Uwe 2006d. Data analysis for the evaluation of parameters of the temporal and spatial frequency distribution of earthquake recurrence around the Goesgen site. *KKG-report*, VER-D-23274, pp. 79.
- Klügel, Jens-Uwe, 2007a. Error inflation in probabilistic seismic hazard analysis. *Engineering Geology* 90, 186-192.
- Klügel, Jens-Uwe, 2007b. How to eliminate non-damaging earthquake from the results of the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)-A comprehensive procedure with site specific application. SMIRT 19, Toronto, paper # 1142.
- Lomnitz-Adler, J. y Lomnitz C., 1979. A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, pp. 1999-2003.
- Matsushima, S., y H. Kawase, 2000. Multiple asperity source of the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995 and strong motion simulation in Kobe. *J. Struct. Constr. Eng., AIJ*, Vol. 534, 33-40. (En japonés con resumen en inglés ).
- Merz, H. A. y Cornell C. A., 1973a. Seismic risk based on a quadratic magnitude-frequency law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp. 1949-2006.
- Miyake, H., T. Iwata, K. Irikura, 2003. Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulation: Kinematic Heterogeneous Source Model And Strong Motion Generation Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 93, 2531-2545.
- Newmark, N. M. y Hall, W. J., 1973. "Procedures and criteria for earthquake-resistant design", Building Practices for Disaster Mitigation, Washington, D. C., Building Science Series 46, U. S. Department of Commerce, pp. 209-236.
- Nishenko, S. P. y Singh S. K., 1987. 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.

- Ortiz, M., *et al.*, 2000. Sources areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0) and 1957 (M 7.7), as constrained by tsunami and uplift records. *Geofísica Internacional*, Vol. 39, Num. 4, pp. 337-348.
- Panza, G. F., *et al.*, 2008. Recent achievements of the neo-deterministic seismic hazard assessment in the CEI region. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and International Atomic Energy Agency.
- Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis—Issues and Insights. *ColumbiaUniversity Press*, New York, 254 pp.
- SEAOC, 1996. “A framework for performance based design”, Structural Engineers Association of California. VISION 2000 Committee, California.
- Schwartz D. P. y Coppersmith K. J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquake: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B7, pp. 5681-5698.
- Schwartz, D. P., 1988. Geology and seismic hazard: moving into the 1990s. *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, pp. 1-42.
- Shah, H. C., *et al.*, 1975. A study of Seismic Risk for Nicaragua, Part I. Report 11, The Jonh A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, California.
- Singh, S. K., *et al.*, 2007. A Report on the Atoyac, Mexico, Earthquake of 13 April 2007 ( $M_w$  5.9). *Seismological Research Letters*, Vol. 78, Number 6.
- Somerville, Paul G., *et al.*, 2002. Characterizing heterogeneous slip models for large subduction earthquakes for strong ground motion prediction. *Memorias del 11º Simposium de Ingeniería Sísmica*, 163-166. (japonés).
- Suzuki, W., *et al.*, 2005. Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green’s function method. *Earth Planets Space*, Vol. 57, 345-350.
- U. S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>
- Youngs, R. R. y Coppersmith K. J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard assessments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 939-964.
- Zúñiga, F. Ramón y Wyss Max, 2001. Most- and Least-Likely Location of Large to Great Earthquakes along the Pacific Coast of Mexico Estimated from Local Recurrence Times Base don b- Values. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 6, pp. 1717-1728.

Manuscrito recibido: 13 de octubre, 2010

Recepción del manuscrito corregido: 20 de julio, 2011

Manuscrito aceptado: 15 de septiembre, 2011