

# CRITERIOS PARA OBTENER ACELEROGRAMAS DE DISEÑO EN SITIOS AFECTADOS POR VARIAS FUENTES SÍSMICAS USANDO COMO EJEMPLO EL CASO DE TERRENO FIRME DE LA CIUDAD DE MEXICO

*Eduardo Reinoso<sup>(1)</sup> y Miguel A. Jaimes<sup>(1)</sup>*

## RESUMEN

Se propone una metodología para obtener acelerogramas en un sitio afectado por varias fuentes sísmicas. El método consiste en: (1) identificar las principales fuentes sísmicas que afectan al sitio; (2) elaborar un análisis de peligro sísmico probabilista; (3) estimar el espectro de peligro uniforme asociado a un periodo de retorno; (4) aplicar un análisis de desagregación del peligro sísmico probabilista; (5) generar movimientos sísmicos simulados de los escenarios sísmicos; y (6) seleccionar el número de movimientos para abarcar por completo el espectro de peligro uniforme. Se obtiene como ejemplo una familia de movimientos sísmicos en terreno firme de la ciudad de México para que sean usados en la práctica. Se muestra que los registros seleccionados son un conjunto muy útil de todos los movimientos posibles que podrían afectar la ciudad y están disponibles para usarse por ingenieros estructurales y eventualmente poderse incluir en el código.

## ABSTRACT

A methodology to obtain synthetic strong ground motions at a given site affected by several seismic sources is proposed. The method consists on: (1) identification of the main sources that affect the site; (2) computation of a Probabilistic Seismic Hazard Assessment; (3) estimation of the Uniform Hazard Spectra associated to a given return period; (4) application of the Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Assessment; (5) generation of synthetic strong ground motions of the seismic scenarios; and (6) selection of the minimum number of strong ground motions (those whose response spectra match the uniform hazard spectra obtained in step 3). As an example, a family of strong ground motions for the firm soil in Mexico City, ready to be used by structural engineers to analyze and design structures, is also shown; these accelerograms represent the motion that may affect the city (firm soil) considering all seismic sources for a fixed return period.

## INTRODUCCIÓN

En algunos casos, especialmente cuando es necesario evaluar la respuesta en el rango inelástico de estructuras importantes, no es suficiente sólo definir el movimiento sísmico en términos de un espectro de

---

Artículo recibido el 20 de marzo de 2008 y aprobado para su publicación el 20 de septiembre de 2009. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación

<sup>(1)</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F. [ere@pumas.ii.unam.mx](mailto:ere@pumas.ii.unam.mx)  
[mjaimest@iingen.unam.mx](mailto:mjaimest@iingen.unam.mx)

diseño que considera fuerzas relacionadas a parámetros de respuesta máxima como la aceleración y desplazamiento espectral. En los códigos más comunes, el espectro de diseño tiene forma paramétrica cuyas intensidades corresponden a la pseudoaceleración de un sistema de un grado de libertad. Estos parámetros no siempre tienen una correlación directa con la pérdida y el daño; es más, el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis debido al movimiento sísmico severo en un solo evento y durante la vida útil de la estructura no puede tomarse en cuenta. Para ello, se deben usar acelerogramas en el diseño de estructuras importantes y complejas como las represas, puentes, edificios altos o irregulares, estructuras donde varios modos de vibración pudieran ser importantes y estructuras diseñadas para tener demandas altas de ductilidad.

Estos acelerogramas deben reproducir tan bien como sea posible el movimiento esperado en el sitio. Este movimiento debe tener en cuenta la influencia de parámetros tales como la magnitud, la distancia, el mecanismo de falla y efectos del sitio. Desafortunadamente, los códigos y manuales disponibles son vagos, solo mencionan que los acelerogramas deben ser apropiados y compatibles con los espectros de diseño. El criterio implementado por los reglamentos actuales no contiene información suficiente para los ingenieros, y éstos no cuentan con métodos prácticos para generar acelerogramas de diseño y terminan usando cualquier registro que esté disponible y, en muchos casos, probablemente inapropiado para el sitio y la estructura que se esté analizando.

Existen diferentes maneras de obtener acelerogramas con propósitos de diseño. El más fácil es el uso de registros disponibles en bancos de datos mundiales (Bommer *et al.*, 1998, 2000; Bommer y Acevedo, 2004) con características similares; esto significa que el evento sísmico debe tener aproximadamente la misma magnitud y distancia, y el perfil del suelo debe ser similar. Zhai y Xie (2007) crearon un catálogo de movimientos sísmicos de bases de datos mundiales considerando los efectos de intensidad, contenido de frecuencia y duración del movimiento del suelo y las características dinámicas de las estructuras que fueron afectadas por esos sismos. Debido a su sencillez, es común que los ingenieros usen estos métodos pero muchas veces no son conscientes de las diferencias entre fuentes sísmicas, atenuación y efectos de sitio; por ejemplo, hay casos de la práctica en los que para evaluar la respuesta estructural se someten a registros de sismos ocurridos en California, Japón, Chile y México (de zonas diferentes a donde se erigirá el inmueble), lo que evidentemente es inadecuado. Una modalidad de estos métodos y una opción práctica es escalar acelerogramas ya existentes en el sitio al nivel de intensidad requerido. Debido a su simplicidad, esta opción es también muy popular entre los ingenieros; sin embargo, se escala solamente la amplitud del movimiento sin tomar en cuenta la magnitud y distancia con el cambio respectivo en el contenido de frecuencias y la duración del movimiento; además, este escalamiento introduce una gran dispersión en las demandas sísmicas, conduciendo a diseños con incertidumbre y márgenes de seguridad desconocidos (Kurama y Farrow, 2003). Asimismo, el escalamiento introduce errores en la respuesta estructural no lineal que crecen con el grado de escalamiento, con el periodo de vibración de la estructura, con la resistencia global de la estructura y con la sensibilidad de la respuesta estructural no lineal a los modos superiores de vibración (Luco y Bazzurro, 2007). También es posible usar movimientos sísmicos simulados compatibles con un determinado espectro de diseño del sitio (Gasparini y Varmarcke, 1976; Carballo y Cornell, 2000; Naeim *et al.*, 2004); sin embargo, estas historias de tiempo no tienen la apariencia de movimientos sísmicos reales, y cuando la estructura se somete a estos, se podría sobrestimar las demandas de desplazamientos y la energía de entrada (Naeim y Lew, 1995). Un método similar al anterior es seleccionar y escalar registros de movimiento fuerte en el sitio compatibles con un espectro de diseño (Wang *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2000; Malhotra, 2003); sin embargo, el espectro de diseño tiene forma paramétrica por lo que algunas intensidades se sobrestiman. Otros autores han propuesto desarrollar un conjunto de funciones paramétricas que describan la evolución de la intensidad instantánea y el contenido de frecuencia de la aceleración del suelo en términos de la magnitud y distancia de la fuente al sitio (Nojima y Kameda, 1988; Alamilla *et al.*, 2001) pero es necesario tener un número considerable de acelerogramas registrados en el sitio para encontrar parámetros estadísticos en

función de la magnitud y distancia. Otra alternativa es simular movimientos sísmicos basados en un modelo físico que considera la fuente, propagación de la onda y efectos de sitio (Boore, 1983; Silva *et al.*, 1999); un modelo alternativo más conveniente para generar movimientos de fallas distantes es el propuesto por Hartzell (1978) que usa sismos pequeños registrados como funciones de Green empíricas para simular sismos grandes; estos métodos tienen la ventaja de considerar un modelo físico de la fuente, pero hay todavía incertidumbres en la estimación de parámetros sismológicos como la caída de esfuerzos, el momento sísmico y la atenuación, entre otros. Finalmente, se han llevado a cabo análisis probabilistas de demandas sísmicas (Shome *et al.*, 1998; Shome y Cornell, 1999; Chan *et al.*, 2005) con el propósito de encontrar, en una cierta estructura, el número de registros a usarse, escalando registros para estimar la demanda sísmica; entonces, el número requerido de registros para obtener una estimación razonable de la respuesta se reduce significativamente disminuyendo la dispersión en la estimación de las demandas. El método podría incluir una desagregación del peligro de la distorsión sísmica (Baker *et al.*, 2005), esto significa, encontrar los pares de magnitud y distancia que causan una cierta distorsión de entrepiso. Baker y Cornell (2005, 2006) proponen un método para encontrar el espectro de respuesta condicional de un movimiento del suelo, dado un nivel de aceleración espectral en el periodo del primer modo de vibración de la estructura  $S_a(T_1)$  y al valor medio asociado de magnitud, distancia y epsilon (epsilon se define como una medida de la diferencia entre la aceleración espectral de un registro y la calculada con una ley de atenuación del movimiento sísmico en el periodo  $T_1$  requerido); entonces pueden seleccionarse registros escalados que se acoplen a la media del espectro objetivo.

En general, podríamos decir que los métodos descritos o son muy simplistas o son muy complicados para su uso práctico. Muchos de ellos requieren datos que en la mayoría de los casos no existen, como una colección de acelerogramas en el sitio, o bien se requiere conocer la estructura para determinar el número de registros útiles para dar una cierta distorsión de diseño. Al margen del método que los ingenieros usen para obtener acelerogramas, deben ser conscientes que cada sitio es afectado por muchas fuentes sísmicas, y que se necesitan varios acelerogramas para predecir el comportamiento que la estructura tendrá durante su vida útil. Es más, es posible esperar una gran variedad de movimientos sísmicos debido a las variaciones e incertidumbres en los parámetros (sismológicos, modelo de simulación y otros). Esta información está incluida implícitamente en los espectros de peligro uniforme (EPU) que tiene en cuenta la contribución de todas las fuentes sísmicas. Pero este EPU no está disponible para los ingenieros dado que normalmente éstos usan el espectro de diseño, que por su forma paramétrica inevitablemente sobrestima algunas intensidades sísmicas. Por lo tanto, resulta conveniente encontrar una familia de acelerogramas cuyos espectros de respuesta ajusten al EPU y hacerlos disponibles a los ingenieros, como se propone en este trabajo. Para ello, suponemos implícitamente, que si se estiman adecuadamente los movimientos sísmicos en el sitio de interés, la respuesta estructural esperada será adecuada.

## MÉTODO PROPUESTO

Para obtener acelerogramas de diseño o una familia de movimientos fuertes de suelo para un sitio afectado por dos o más fuentes sísmicas se proponen los siguientes pasos:

1. Identificar las principales fuentes sísmicas que afectan al sitio. Existen varios lugares en el mundo que son afectados por diferentes fuentes sísmicas, por lo que se deben usar varios movimientos del suelo para cubrir todos los escenarios de movimientos fuertes.
2. Realizar una evaluación probabilista del peligro sísmico (*Probabilistic seismic hazard assessment*, PSHA; Esteva, 1967; Cornell, 1968). Esto permite obtener la frecuencia para la cual un parámetro sísmico (por ejemplo aceleración pico, duración, ordenada espectral) es mayor que un valor

específico durante un cierto tiempo. De esta manera, es posible incluir todas las fuentes sísmicas posibles que podrían afectar a la zona, tomando en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias. La salida de un PSHA es una o más curvas para el sitio que relacionan los parámetros del movimiento fuerte a un periodo de retorno.

3. Calcular el espectro de peligro uniforme (EPU) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno). De las curvas de peligro sísmico es posible obtener el EPU asociado a una tasa de excedencia. El EPU representa las ordenadas sísmicas cuyas intensidades tienen la misma probabilidad de ocurrir, considerando la contribución de todas las fuentes sísmicas.

Existen sitios en el mundo en donde podrían existir EPU debido al trabajo de investigadores e ingenieros locales, por lo que los pasos 1-3 podrían omitirse.

4. Realizar la desagregación del peligro sísmico probabilista (*Disaggregation probabilistic seismic hazard assessment*, DPSHA). La DPSHA nos permite identificar los escenarios sísmicos que contribuyen significativamente al peligro sísmico del sitio (Ishikawa y Kameda, 1998, 1991; Chapman, 1995; McGuire, 1995; Bazurro y Cornell, 1999; Alamilla *et al.*, 2001; Harmsen y Frankel, 2001). El objetivo es obtener la magnitud y distancia de la fuente sísmica para generar movimientos de diseño usando una función de densidad de probabilidad condicional conjunta de la magnitud y distancia para un nivel de intensidad en el modelo del PSHA.
5. Generar varios movimientos de suelo simulados para los escenarios sísmicos definidos en el paso (4) en términos de la magnitud y distancia. Posteriormente, obtener el espectro de respuesta para todos estos movimientos y compararlos con el EPU.
6. Seleccionar el número mínimo de espectros de respuesta que ajusten las amplitudes del EPU; los movimientos correspondientes a los espectros de la respuesta seleccionados son los respectivos movimientos de diseño.

## **EJEMPLO DE APLICACIÓN: ACELEROGRAMAS DE DISEÑO PARA TERRENO FIRME EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

El crecimiento de la Ciudad de México ha originado un desarrollo urbano importante al sur y al poniente donde se han construido puentes, centros comerciales, de negocios, educativos y residenciales. Aquí, el terreno es firme, y en algunos sitios está formado por piedra volcánica y flujos de lava. La estación Ciudad Universitaria (CU) se localiza en esta área y se considera como el principal sitio de referencia sísmico porque desde 1964 ha registrado más de 30 sismos moderados e intensos ( $M > 6.0$ ). Esto hace a CU probablemente la estación acelerométrica de campo libre más prolífica en el mundo, y nos permite hacer buenas predicciones del movimiento en la Ciudad de México.

A continuación se aplica el método propuesto para obtener los movimientos de diseño sísmico para terreno firme válidos para el sur y el poniente de la Ciudad de México. Se usa este caso por ser un excelente ejemplo de un sitio afectado por varias fuentes sísmicas.

### **Paso 1. Fuentes sísmicas**

El peligro sísmico en la Ciudad de México se debe a tres fuentes: subducción, profundidad intermedia y continentales o locales. Todos ellos han causado en el pasado pérdidas económicas y fatalidades. Los sismos de subducción no sólo tienen lugar con más frecuencia, sino que también causan los movimientos más violentos en el valle de México debido a que el tipo de ondas que producen son ricas en periodos largos que sufren menos atenuación y gran amplificación en la zona de lago. Los sismos de

profundidad intermedia se localizan dentro de las placas, su magnitud ocasionalmente es mayor que 7.0 y su ocurrencia es mucho más esporádica; sin embargo, debido a su proximidad representan un peligro muy alto para la población de la Ciudad de México. Los sismos locales o continentales son las fuentes que podrían producir las aceleraciones en campo libre más grandes, sobre todo en terreno firme pero su peligro sísmico es pequeño debido a que los periodos de recurrencia de los sismos intensos son muy grandes (>1000 años). La figura 1 muestra los límites y ubicación de las principales fuentes sísmicas de subducción y profundidad intermedia idealizadas por polígonos (Nishenko y Singh, 1987); también se muestra, junto con su fecha y magnitud, la ubicación de epicentros de sismos de subducción (rectángulos) y profundidad intermedia (triángulos) usados en este estudio.

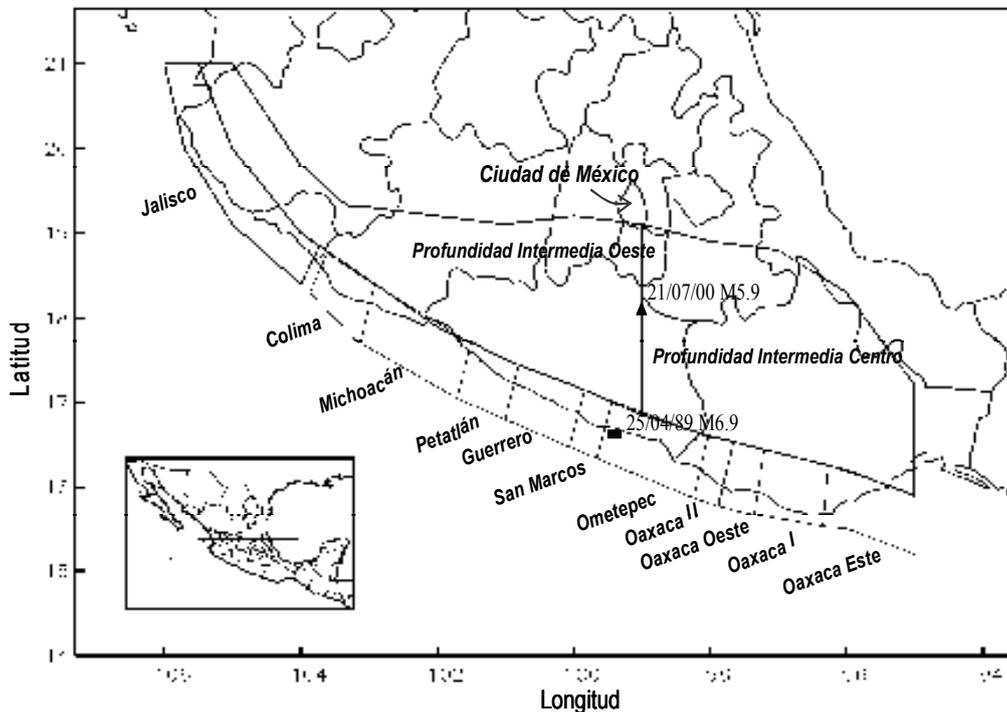


Figura 1. Zonas de subducción y profundidad intermedia idealizadas por polígonos (Nishenko y Singh, 1987) y los epicentros de sismos usados en este estudio (rectángulo, evento de subducción, y triángulo, evento de profundidad intermedia)

## Paso 2. Evaluación probabilista del peligro sísmico

Para la selección de los movimientos sísmicos de diseño es deseable contar con un análisis probabilista del peligro sísmico (*Probabilistic seismic hazard assessment*, PSHA; Esteva, 1967; Cornell, 1968) dada por la ec. (1),

$$v(y) = \sum_{i=1}^N \int_{M_o}^{M_U} \lambda_o p(M) \cdot \Pr(Y > y | M, R) dM \quad (1)$$

donde  $N$  es el número total de fuentes sísmicas,  $M_o$  y  $M_U$  son la magnitud mínima y máxima que se puede generar en la fuente sísmica;  $\lambda_o$  es la tasa de excedencia de magnitud de  $M = M_o$ ,  $p(M)$  es la

función de densidad de probabilidad de la magnitud,  $P(Y \geq y|M, R)$  es la probabilidad condicional de que la intensidad exceda el valor de  $y$  en el sitio, dado que sucedió un sismo de magnitud  $M$  a la distancia  $R$ .

Se calcularon las curvas de peligro sísmico en terreno firme de la Ciudad de México dadas en términos de tasas de excedencia para pseudoaceleraciones espectrales para periodos estructurales entre 0 y 4 s. Se usaron las fuentes sísmicas previamente mostradas (fig. 1) y tres diferentes leyes de atenuación para calcular el peligro sísmico con el software CRISIS 2003: *i*) para los sismos de subducción se usó la relación derivada por Jaimes *et al.* (2006) quienes utilizaron 22 acelerogramas registrados en la estación CU, *ii*) para los sismos de profundidad intermedia se empleó una ley de atenuación presentada por Montalvo-Arrieta (2002) y, finalmente, *iii*) para el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano se utilizó la relación de Sadigh *et al.* (1997). En la figura 2 se muestran las curvas de peligro sísmico en términos de pseudoaceleración espectral (5% de amortiguamiento) en CU para dos periodos estructurales ( $T=0.2$  y  $2$  s). Las figuras corresponden a las fuentes sísmicas siguientes: subducción (líneas continuas delgadas), profundidad intermedia (líneas discontinuas gruesas), local (líneas discontinuas delgadas) y la contribución total de todas las fuentes sísmicas (líneas continuas gruesas). Se puede observar que el peligro sísmico para las estructuras con periodo de  $0.2$  s (fig. 2a) está dominado por las fuentes de profundidad intermedia (líneas discontinuas gruesas), y para las estructuras con  $T=2$  s (fig. 2b) está dominado por fuentes de subducción (líneas continuas delgadas). Los eventos de origen local (líneas discontinuas delgadas) también pueden afectar estructuras de periodo corto.

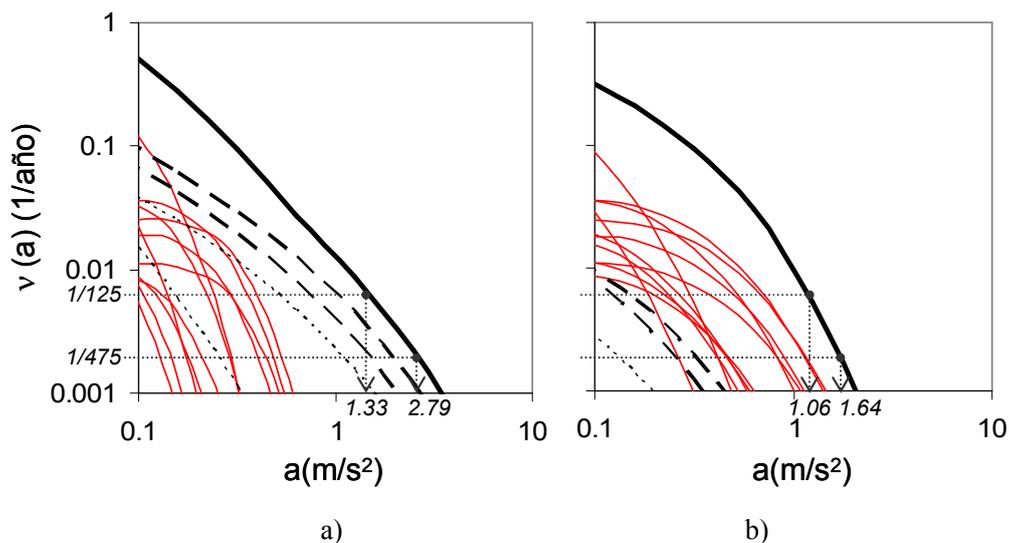


Figura 2. Curvas de peligro sísmico para dos periodos estructurales en terreno firme de la Ciudad de México. Subducción (líneas continuas delgadas), profundidad intermedia (líneas discontinuas gruesas), local o continental (líneas discontinuas delgadas) y todas las fuentes (líneas continuas gruesas). Para periodos estructurales de a)  $0.2$  y b)  $2.0$  s

### Paso 3. Espectro de peligro uniforme

De las curvas de peligro sísmico es posible obtener el espectro de peligro uniforme (EPU) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno). Por ejemplo, si se desea construir en CU un EPU se obtiene (fig. 2a) para un periodo estructural de  $0.2$  s, las intensidades espectrales de  $1.33$   $m/s^2$  y  $2.79$   $m/s^2$  para las tasas de excedencia de  $1/125$  y  $1/475$  ( $1/año$ ), respectivamente. Procediendo

análogamente para un periodo estructural de 2 s, en este caso, las ordenadas espectrales para las mismas tasas de excedencia son  $1.06 \text{ m/s}^2$  y  $1.64 \text{ m/s}^2$  (fig. 2b).

Siguiendo el procedimiento anterior para varios periodos estructurales se construyeron los EPU que se muestran en la figura 3 para 125 y 475 años (línea delgada y gruesa, respectivamente); en la misma figura se muestra el espectro de diseño del reglamento vigente (línea discontinua). Se puede observar que el EPU de 125 años está cubierto por el espectro de diseño; el EPU de 475 podría compararse con el espectro correspondiente a estructuras tipo A (el espectro de diseño mostrado multiplicado por un factor de importancia de 1.5). El periodo de retorno de 125 años es el mismo que se usó para obtener el espectro de diseño vigente para el código de diseño de la Ciudad de México (Ordaz *et al.*, 2000). Por consiguiente, asumimos que tal periodo de retorno da niveles de intensidades que proporcionarán un nivel aceptable de riesgo. Por otro lado, en ambos EPU hay dos ordenadas máximas que reflejan el peligro sísmico de dos tipos de fuentes: profundidad intermedia, en  $T \approx 0.2 \text{ s}$ , y subducción, en  $T \approx 1 \text{ s}$  (figura 3).

En el mejor de los casos, algunos ingenieros seleccionarían movimientos sísmicos de tal manera que el espectro de respuesta correspondiente se ajustara al espectro de diseño (Wang *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2000; Malhotra, 2003). Pero debido a su forma paramétrica algunas de las intensidades sísmicas de los espectros de diseño son mayores que las de los EPU (fig. 3) y por tanto esas intensidades estarán sistemáticamente sobreestimadas en el diseño. Esto es por lo que pensamos que los acelerogramas de diseño deben ajustar el EPU y no al espectro de diseño.

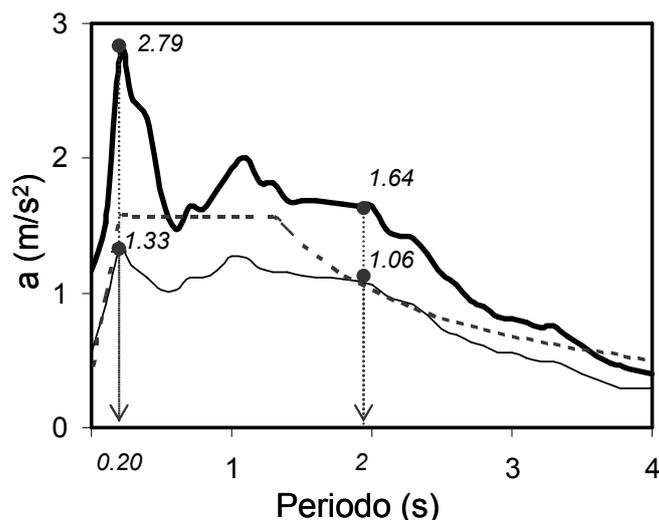


Figura 3. Espectro de peligro uniforme en terreno firme de la Ciudad de México para dos periodos de retorno: 125 (línea delgada) y 475 años (línea gruesa) y espectro de diseño del reglamento vigente (línea discontinua) basado en un periodo de retorno de 125 años

Para la mayoría de los sitios en el mundo un solo movimiento de diseño asociado a un nivel de peligro no va a ser suficiente para representar todas las posibilidades de movimientos que afectarán a las estructuras en su vida útil, por lo que deben emplearse varios movimientos de diseño para cubrir todos los escenarios contenidos en el EPU. De esta manera se usan movimientos con diferente contenido de frecuencia para probar algunos parámetros de la respuesta estructural como la demanda de ductilidad (Lam *et al.*, 1996). En el caso de la Ciudad de México, Jaimes y Reinoso (2006) muestran que los sismos de profundidad intermedia podrían causar mayores distorsiones de entrepiso en estructuras de periodo corto y mayor participación de los modos superiores en estructuras de periodo largo. Por consiguiente, un

sólido diseño de una estructura en terreno firme en la Ciudad de México debe usar por lo menos acelerogramas de diseño de sismos de subducción así como algunos de profundidad intermedia y locales. De esta manera, uno podría evaluar mejor la respuesta estructural y determinar el daño que podrían causar estos tipos de sismos.

#### Paso 4. Desagregación del peligro sísmico

Calculamos la desagregación del peligro sísmico probabilista (*Disaggregation probabilistic seismic hazard assessment*, DPSHA) mediante el uso de la técnica descrita en Chapman (1995) dada por la ec. (2),

$$U(M, R|y) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \lambda_o p(M)_i p(R)_i \cdot \Pr(Y \geq y|M, R)_i \quad (2)$$

donde  $U(\cdot)$  es considerada la densidad de probabilidad condicional conjunta de  $M$  y  $R$  para un valor de intensidad,  $y$ ;  $N$  es el número total de fuentes sísmicas;  $\alpha_i$  es la tasa de actividad para la fuente sísmica,  $i$ ;  $\lambda_o$  es la tasa de excedencia de magnitud de  $M = M_o$ ;  $p(M)$  y  $p(R)$  son las funciones de densidad de probabilidad de la magnitud y distancia, respectivamente, y  $P(Y \geq y|M, R)$  ha sido definido previamente.

Esto nos permite establecer la magnitud y la distancia de la fuente sísmica de donde procede el sismo que, en términos probabilistas, más contribuye al peligro sísmico del sitio en estudio. Con ello, se obtienen parejas de valores de magnitud y distancia que más frecuentemente ocurren (moda). Con estos valores es posible calcular movimientos de acuerdo a un escenario sísmico realista, donde algunos parámetros para diseño, tal como la duración del movimiento sísmico, se derivan de la magnitud y distancia obtenida. Iervolino y Cornell (2005) muestran que existe poca evidencia para sostener la necesidad de realizar un proceso cuidadoso de selección del registro para un sitio específico por magnitud y distancia. Esto significa que bastaría con seleccionar un registro al azar de un catálogo grande. Sin embargo, pensamos que en sitios afectados por varias fuentes sísmicas es necesario identificar las fuentes sísmicas controladoras (Malhotra, 2003) en términos de la magnitud y distancia y representar la fuente sísmica de interés (local, profundidad intermedia y subducción) como se muestra más adelante.

Se obtuvieron las funciones de densidad de probabilidad condicional conjunta de la magnitud y la distancia para un periodo de retorno de 125 años, para la aceleración máxima del suelo (*peak ground acceleration*, PGA) y para los periodos estructurales de 0.2, 0.5, 1, 2 y 3 s cuyas intensidades corresponden a 0.53, 1.33, 1.02, 1.27, 1.06 y 0.56 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Estos periodos estructurales fueron seleccionados para ejemplificar como diferentes periodos estructurales corresponden a escenarios sísmicos distintos dados en términos de la magnitud y la distancia. En la figura 4 se muestra la función de densidad de probabilidad condicional conjunta de la magnitud y distancia obtenida de la DPSHA; también se indican los valores modales de la magnitud,  $M$ , y distancia,  $R$ , que presentan la mayor probabilidad de ocurrencia. La magnitud y distancia definen el área sísmica para escoger la función de Green empírica (FGE) apropiada para representar la fuente sísmica de interés: por ejemplo, en la Ciudad de México, un movimiento sísmico grande y distante corresponde a una fuente de subducción y un movimiento sísmico grande y menos distante corresponde a una fuente de profundidad intermedia. En la figura 4, se observa que tres funciones de probabilidad de peligro son bimodales (PGA, T=0.2 y 0.5 s), reflejando claramente las contribuciones de dos fuentes sísmicas y otras tres unimodales (T=1, 2 y 3 s). Se puede apreciar que para T=0.2 el peligro sísmico está dominado por sismos de profundidad intermedia ( $M \approx 7.7$ ,  $R \approx 160$  km), para T=0.5 ambas fuentes contribuyen, y para T=1, 2 y 3 s está dominado por sismos de subducción ( $M \approx 7.7$ ,  $R \approx 263$  km). Pero hay claramente otras parejas de valores modales para distintos periodos estructurales que deben tenerse en cuenta para representar adecuadamente los movimientos sísmicos más

probables, como la magnitud 4.8 debido a origen local para periodo corto y una magnitud 7.7 a 160 km, debido a una fuente de profundidad intermedia. Estos eventos contribuyen igualmente al peligro sísmico pero sus movimientos sísmicos se espera que sean diferentes.

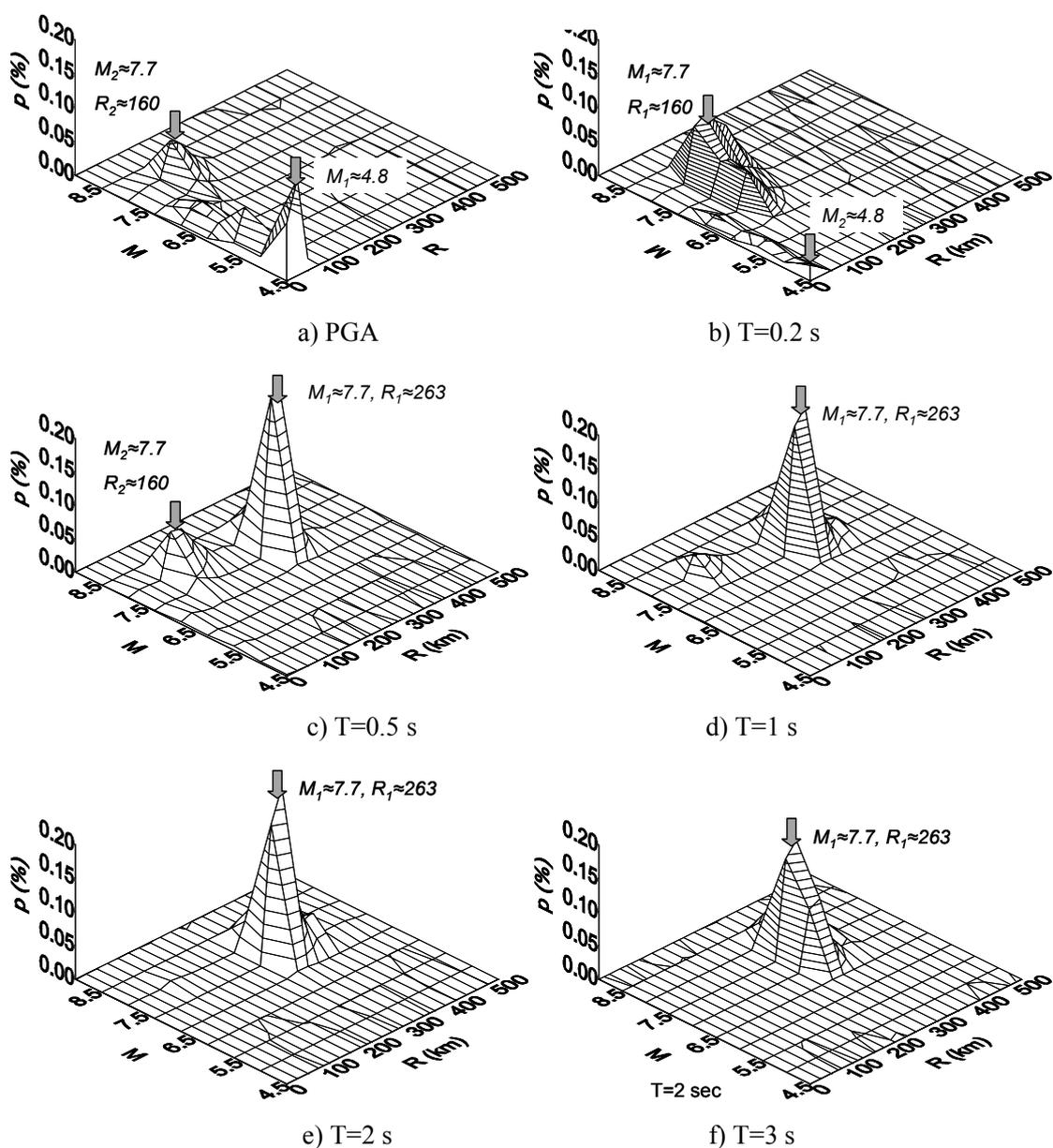


Figura 4. Funciones de densidad de probabilidad condicional conjunta de la magnitud y distancia cuya intensidad sísmica está asociada a un periodo de retorno de 125 años, para diferentes periodos estructurales en terreno firme. Se indican las parejas de valores de magnitud y distancia que tienen la mayor probabilidad para generar esta intensidad

### Paso 5. Simulación de movimientos

Se usan parejas de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos simulados en terreno firme (CU) usando el método de las funciones de Green empíricas (Ordaz *et al.*, 1995) para intensidades sísmicas (ordenadas espectrales) asociadas a un periodo de retorno de 125 años. La aplicación del método requiere de sismos registrados, generalmente pequeños, usados como funciones de Green empíricas (FGE) para simular movimientos de diferente magnitud para la misma distancia epicentral. Pero es necesario simular no sólo movimientos con diferente magnitud sino también con diferente distancia dado que es muy poco probable que la distancia obtenida con el proceso de desagregación corresponda a uno de los sismos registrados. Por lo tanto, se usa un esquema para modificar las funciones de Green empíricas por atenuación (Jaimes *et al.*, 2007) con diferentes distancias de la fuente al sitio para las cuales la función de Green está disponible.

Se usaron como FGE para obtener los movimientos simulados dos registros de CU de muy buena calidad donde la llegada de las ondas P y S se observa claramente (fig. 5): 21 de julio de 2000 (profundidad intermedia) y el del 25 de abril de 1989 (subducción). Para el uso de la FGE se requiere conocer algunos parámetros que caractericen los eventos grandes futuros que son desconocidos y con grandes incertidumbres que influyen de manera importante en las estimaciones de los movimientos sísmicos. La Tabla 1 muestra los parámetros sismológicos usados para modificar las dos FGE por efectos de atenuación. Debido a la variabilidad de los tiempos de ruptura en el modelo de simulación usado, los movimientos simulados se obtienen por aproximaciones sucesivas hasta que se alcanza la ordenada sísmica requerida.

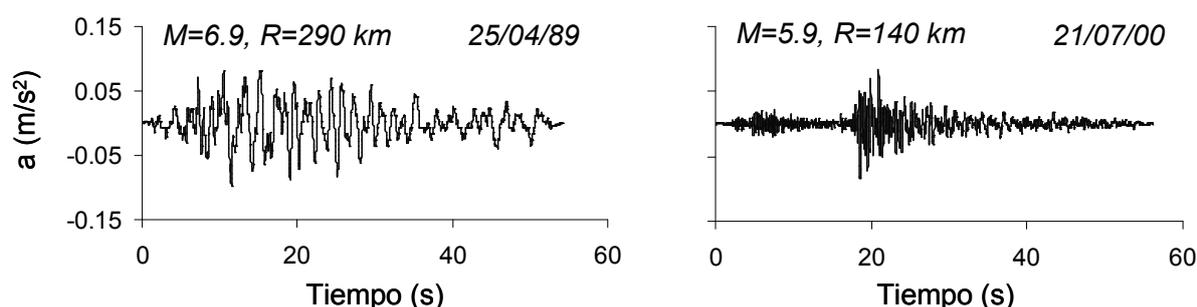


Figura 5. Dos eventos registrados usados como funciones de Green empíricas en terreno firme de la Ciudad de México

Tabla 1. Parámetros sismológicos de los eventos usados como funciones de Green empíricas

Evento	Tipo	M	R (km)	$\beta$ (km/s)	$Q_o$	$\varepsilon$	$M_{os}$ (dinas.cm)	$\Delta\sigma$ (bars)
*25/04/89	Sub	6.9	290	3.20	273	0.66	$2.4 \times 10^{26}$	150
*21/07/00	Prof. Inter.	5.9	140	4.68	251	0.58	$6.0 \times 10^{24}$	298

\*  $M_{os}$  y  $\Delta\sigma$ , Ordaz *et al.* (1995); \*  $M_{os}$ , Iglesias *et al.* (2002); \*  $\Delta\sigma$ , García *et al.* (2004);  $\beta$ ,  $Q_o$  and  $\varepsilon$ , Ordaz y Singh (1992) y García *et al.* (2004) para sismos de subducción y profundidad intermedia, respectivamente;  $k_o=0.18$  s y  $Q_l=1500$  km, Singh *et al.* (1982)

En la figura 6 se muestran los acelerogramas simulados con los valores correspondientes de magnitud y distancia para la aceleración máxima del suelo (PGA) y los periodos estructurales de  $T=0.2$ ,  $0.5$ ,  $1$ ,  $2$  y  $3$  s; estos movimientos presentan la apariencia de movimientos sísmicos reales y preservan las características de su fuente tales como la amplitud, la duración y el contenido de frecuencias. Por ejemplo,

los movimientos de profundidad intermedia presentan mayor contenido de alta frecuencia ( $T=0.2$  y  $0.5$  s) con respecto a los movimientos de subducción ( $T=1, 2$  y  $3$  s). En la misma figura también se observa un movimiento tipo local. Como se explicará más adelante, la aceleración máxima del suelo en la Ciudad de México está dominada por sismos locales. Para obtener un movimiento local, escalamos simplemente el PGA del evento del sismo local del 12 de julio de 1974 ( $M=3.5$ ) para dar el nivel requerido de intensidad dado que existe muy poca información respecto a la caída de esfuerzos y magnitud.

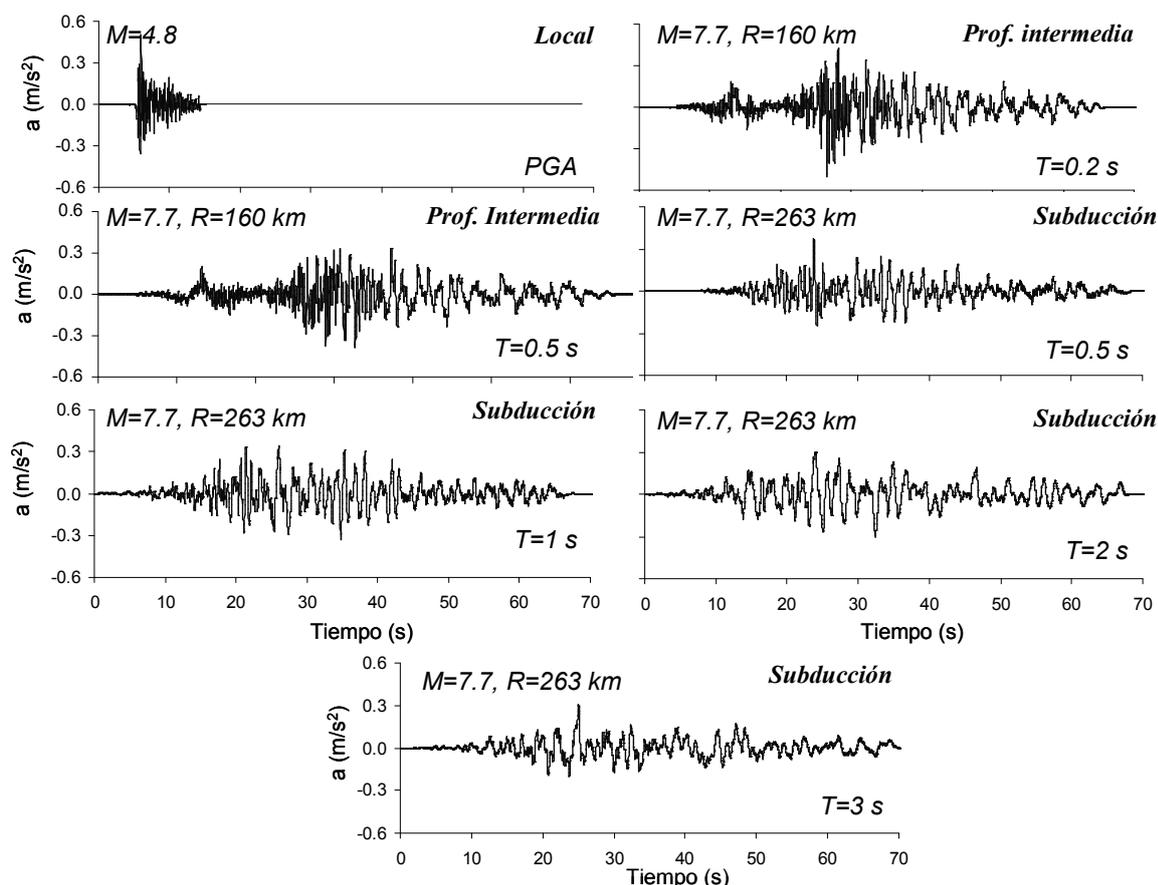


Figura 6. Acelerogramas simulados de tipo local, profundidad intermedia y subducción cuya intensidad en PGA y para los periodos estructurales de  $T=0.2, 0.5, 1, 2$  y  $3$  s está asociada a un periodo de retorno de 125 años

Los espectros de respuesta de los acelerogramas simulados se compararon con el EPU de 125 años para ilustrar que cada uno de ellos cubre una sección de este EPU. En la figura 7 se muestra este EPU (líneas gruesas) y los espectros de respuesta de aceleraciones (líneas delgadas) de los registros simulados mostrados en la figura 6. Se puede observar que para cada periodo estructural se obtiene la correspondiente ordenada del EPU, pero se subestiman el resto de los periodos estructurales. Esto es debido a que estas ordenadas corresponden y deben ser cubiertas por otros escenarios sísmicos. También se observa que los espectros de respuesta exceden ligeramente en algunos periodos los valores de las ordenadas del EPU pero esta sobrestimación no resulta importante para propósitos de ingeniería. Nótese que las formas espectrales seleccionadas debido a un sismo local o de profundidad intermedia ajustan mejor las ordenadas espectrales en periodos estructurales menores a  $0.5$ s. En cambio, los sismos de subducción controlan las formas espectrales para periodos estructurales mayores a  $0.5$ s.

### **Paso 6. Selección del número de movimientos para ajustar al EPU**

Si bien es deseable realizar análisis probabilistas de las demandas sísmicas considerando no solamente las familias de acelerogramas que podrían afectar al lugar sino también las familias de estructuras representativas de la zona, esto resulta todavía poco factible. Por ello, proponemos en este trabajo encontrar un conjunto de acelerogramas cuyos espectros de respuesta ajusten el EPU.

Calculamos los espectros para todas las fuentes sísmicas y para muchos periodos estructurales, pero solamente presentamos aquellos que visualmente y en conjunto mejor ajustan el EPU. Se espera que las estructuras de periodo corto sean excitadas por un movimiento local o de profundidad intermedia, y las de periodo largo por un movimiento de subducción; sin embargo, si estas estructuras presentan sensibilidad a los modos superiores entonces también por un movimiento local o de profundidad intermedia. En lo que sigue, proponemos para cuáles periodos estructurales las ordenadas espectrales deben ser calculadas para un EPU de 125 años. Los diferentes movimientos de diseño propuestos se explican a continuación, y sus espectros de respuesta se muestran en la figura 7:

- Acelerograma I: El primer movimiento sísmico debe ser un sismo local con una aceleración máxima (PGA) asociada al EPU (fig. 7). Este movimiento sísmico no sólo debe usarse para estructuras rígidas sino también para el análisis de terraplenes y laderas. En la figura 7 se aprecia que de no usarse este acelerograma los periodos cortos ( $T < 0.1$  s) estarían siempre subestimados.
- Acelerograma II: El EPU del sitio en estudio tiene un marcado pico en 0.2 s causado por fuentes de profundidad intermedia (fig. 7). Por ello, este acelerograma debe ser de este tipo de fuente con  $M \approx 7.7$  y  $R \approx 160$  km.
- Acelerograma III: El tercer movimiento sísmico debe seleccionarse de ambas fuentes de profundidad intermedia y subducción asociado a un periodo estructural de 0.5 s; esto es porque el peligro sísmico está dominado por ambas fuentes sísmicas (fig. 4).
- Acelerograma IV, V y VI: Para periodos estructurales más grandes que 1 s, el peligro sísmico está dominado por fuentes de subducción (figs. 4 y 7). Al menos dos movimientos sísmicos deben seleccionarse (para  $T=1$  y 2 s, fig. 6) y, para estructuras de periodo largo ( $T > 2$  s), otro acelerograma para  $T=3$  s (fig. 6).

De la figura 7 se puede observar que los espectros de respuesta de los acelerogramas de diseño propuestos ajustan muy bien el EPU.

Debido a que aún no se han construido leyes de atenuación para ordenadas de espectros inelásticos, verificamos que los espectros inelásticos de estos mismos acelerogramas tuvieran ordenadas inferiores o similares a los espectros inelásticos de diseño contenidos en el reglamento de construcciones. La figura 8 muestra el espectro de diseño del código de la ciudad de México para un factor de ductilidad  $\mu=2$  y los espectros inelásticos de los acelerogramas simulados de la figura 6 (líneas delgadas). Se puede ver que los espectros inelásticos calculados están por debajo de los de diseño. Si bien los acelerogramas propuestos (figura 6) no fueron seleccionados con criterios de comportamiento no lineal sí arrojan resultados equivalentes al reglamento sobre el comportamiento elastoplástico de estructuras de un grado de libertad.

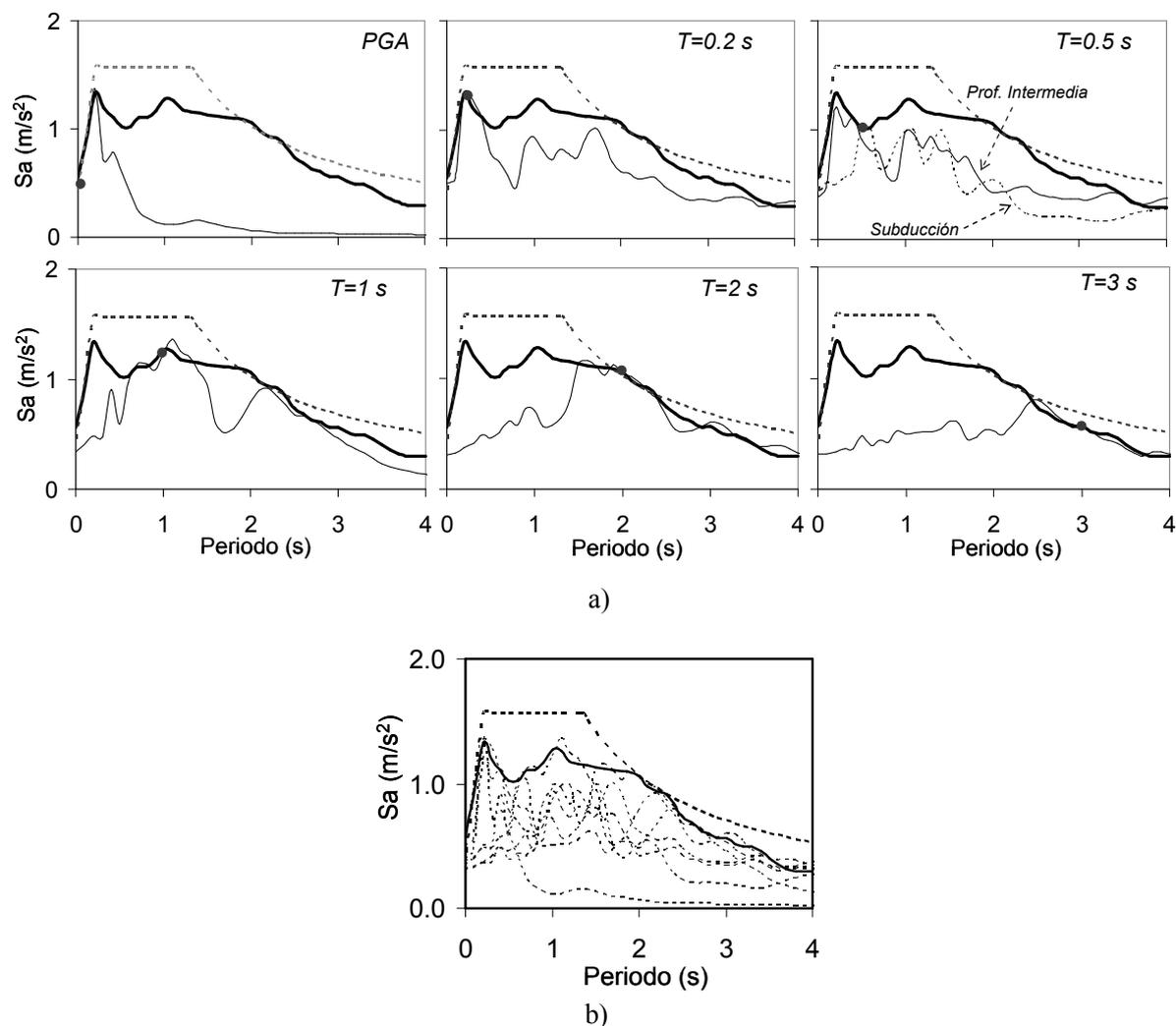


Figura 7. Espectro de diseño (líneas discontinuas gruesas), espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 125 años (líneas gruesas) y espectros de respuesta de los acelerogramas simulados cuya intensidad sísmica está asociada a: a) PGA y a los periodos estructurales de  $T=0.2$ ,  $0.5$ ,  $1$ ,  $2$  y  $3$  s (líneas delgadas) y b) todos los espectros

La figura 9 muestra los mismos espectros que la figura 8 pero para un factor de reducción por ductilidad de 4. En este caso algunas ordenadas, sobre todo en periodos cortos, de los espectros de respuesta de los acelerogramas simulados son mayores que las del espectro de diseño. Si bien no consideramos que esto sea una prueba de que los espectros reglamentarios para este factor de reducción y para esas ordenadas estén mal, sí recomendamos utilizar directamente los acelerogramas y obtener la respuesta inelástica de las estructuras con métodos modernos y no aplicando directamente el reglamento.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para obtener acelerogramas de diseño para un sitio específico. La metodología se basa en obtener acelerogramas cuyos espectros de respuesta ajusten el Espectro de Peligro Uniforme (EPU) considerando la identificación de las fuentes sísmicas que afectan al sitio y un análisis de peligro sísmico probabilista; después, se aplica un análisis de desagregación del peligro sísmico, encontrando la magnitud y distancia para todas las fuentes sísmicas que tienen más probabilidad para generar una intensidad dada por el EPU. Con cada pareja de magnitud y distancia, se calcula el respectivo movimiento sísmico y espectro de respuesta; los acelerogramas de diseño serán aquellos cuyos espectros de respuesta mejor ajusten al EPU.

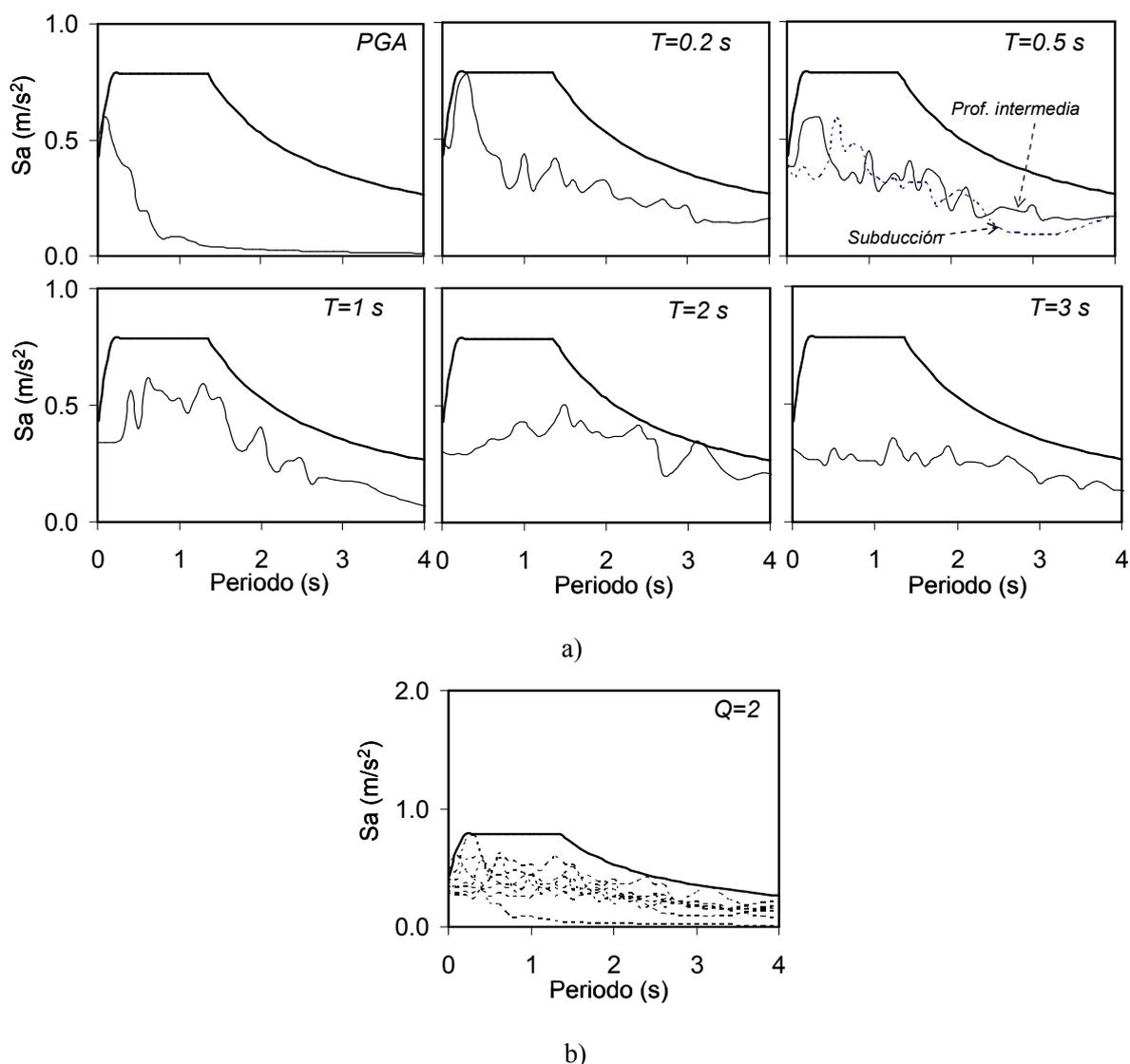
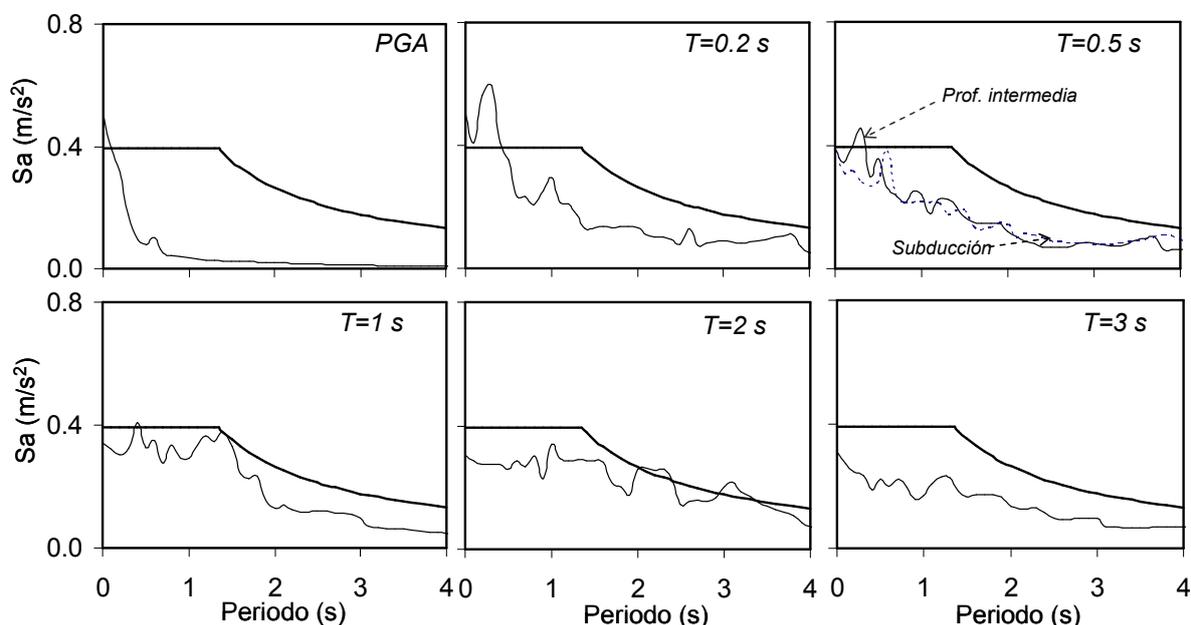
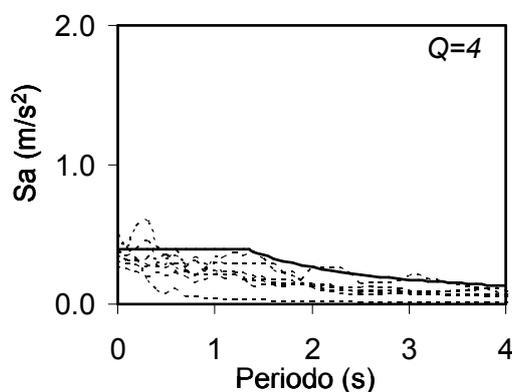


Figura 8. Espectro de diseño con factor de reducción por ductilidad de 2 (línea continua gruesa) y espectros de respuesta elastoplásticos para un factor de ductilidad de  $\mu=2$  de los acelerogramas simulados cuya intensidad sísmica está asociada a: a) PGA y a los periodos estructurales de  $T=0.2, 0.5, 1, 2$  y  $3$  s (líneas delgadas) y b) todos los espectros



a)



b)

Figura 9. Espectro de diseño con factor de reducción por ductilidad de 4 (línea continua gruesa) y espectros de respuesta elastoplásticos para un factor de ductilidad de  $\mu=4$  de los acelerogramas simulados cuya intensidad sísmica está asociada a: a) PGA y a los periodos estructurales de  $T=0.2, 0.5, 1, 2$  y  $3$  s (líneas delgadas) y b) todos los espectros

Con esta metodología, se ejemplifica la obtención de una familia de movimientos sísmicos en terreno firme de la Ciudad de México que pueden ser usados en la práctica con propósitos de diseño. Se recomienda que se usen hasta siete acelerogramas: para PGA una fuente local, para  $T=0.2$  y  $0.5$  s una fuente de profundidad intermedia, para  $T=0.5, 1, 2$  y  $3$  s una fuente de subducción. Finalmente, se

examina que los espectros de respuesta inelásticos respectivos calculados para todos los movimientos concordaran con los espectros inelásticos incluidos en el código, encontrando que la mayoría de ordenadas calculadas fueron muy similares a las del código, excepto para algunos periodos cortos para el factor de reducción de cuatro, donde las ordenadas calculadas con los acelerogramas fueron mayores.

### AGRADECIMIENTOS

El segundo autor reconoce y agradece el apoyo financiero de CONACyT. Agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos que mejoraron la calidad del artículo.

### REFERENCIAS

- Alamilla, J, L Esteva, P J García y L O Díaz (2001), “Simulating earthquake ground motion at a site, for given intensity and uncertain source location”, *Journal of Seismology*, Vol. 5, No. 4, pp. 475-485.
- Baker, J W, C A Cornell y P Tothong (2005), “Disaggregation of seismic drift hazard”, *Proceedings, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR05)*, Rome, Italy, 7p.
- Baker, J W, y C A Cornell (2005), “A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, pp. 1193-1217.
- Baker, J W y C A Cornell (2006), “Spectral shape, epsilon and record selection”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 1077-1095.
- Bazurro, P y C Cornell (1999), “Disaggregation of seismic hazard”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 89, No.2, pp. 501-520.
- Bommer, J J, S G Scott y S K Sarma (1998), “Time-history representation of seismic hazard”, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.
- Bommer, J J, S G Scott y S K Sarma (2000), “Hazard-consistent earthquake scenarios”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 219-231.
- Bommer, J J y A B Acevedo (2004), “The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp. 43–91.
- Boore, D G (1983), “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 73, pp. 1865-1894.
- Carballo, J E, y C A Cornell (2000), “Probabilistic seismic demand analysis: spectrum matching and design”, *Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University*, Report No. RMS-41.
- Chan, S, S Ruiz y M Montiel (2005), “Escalamiento de acelerogramas y mínimo número de registros requeridos para el análisis de estructuras” *Revista de Ingeniería Sísmica SMIS*, No. 7, pp. 1-24.
- Chapman, M (1995), “A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 3, pp. 937-942.
- Cornell, C A (1968), “Engineering seismic risk analysis”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
- Esteva, L (1967). “Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico”, *3er Simposio Panamericano de Estructuras*, Caracas, Venezuela.

- Gasparini, D, y E H Vanmarcke (1976), "SIMQKE: A Program for artificial motion generation", *Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*.
- García, D, S K Singh, M Herráiz, J F Pacheco y M Ordaz (2004), "Inslab earthquakes of central Mexico: Q, source spectra and stress drop", *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 789-802.
- Harmesen, S, y A Frankel (2001), "Geographic disaggregation of seismic hazard in the United States", *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 1, pp. 13-26.
- Hartzell, S (1978), "Earthquake aftershocks as Green's functions", *Geophysical Research Letter*, 5, 1-4.
- Iervolino, I y C A Cornell (2005), "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685-713.
- Iglesias, A, S K Singh, J F Pacheco y M Ordaz (2002), "A source and wave propagation study of the Copalillo, Mexico earthquake of July, 2000 (Mw=5.9): Implications for seismic hazard in Mexico city from Inslab earthquakes", *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 3, pp. 1060-1071.
- Ishikawa, Y y H Kameda (1988), "Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis", *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto, Japón, II, pp. 89-94.
- Ishikawa, Y y H Kameda (1991), "Probability-based determination of specific scenario earthquake", *Proceedings of Fourth International Conference of Seismic Zonation*, Stanford CA, II, pp. 3-10.
- Jaimés, M A y E Reinoso (2006), "Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y falla normal", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 74, pp. 1-21.
- Jaimés, M A, E Reinoso y M Ordaz (2006), "Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 1-16.
- Jaimés, M A, E Reinoso y M Ordaz (2008), "Empirical Green's function modified by attenuation for sources located at intermediate and far distances from the original source", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, p.p. 1-12.
- Kurama, Y C y K T Farrow (2003), "Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, pp. 2425-2450.
- Lam, N, J Wilson y G Hutchinson (1996), "Buildings ductility demand: interplate versus intraplate earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, pp. 965-985.
- Lee, L H, H H Lee, y S W Han (2000), "Method of selecting design earthquake ground motions for tall buildings", *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 9, No. 3, pp. 201-213.
- Luco, N y P Bazzurro (2007), "Does amplitude scaling of ground motion records result in based nonlinear structural drift response?", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 1813-1835.
- Malhotra, P K (2003), "Strong-motion records for site-specific analysis", *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 3, pp. 557-578.
- McGuire, R K (1995), "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop", *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 5, pp. 1275-1284.

- Montalvo-Arrieta, J (2002), “La respuesta sísmica del terreno firme en la Ciudad de México. Observaciones y modelos”, *Tesis de doctorado, Posgrado de Ingeniería, UNAM*.
- Naeim, F y M Lew (1995), “On the use of the design spectrum compatible time histories”, *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 1, pp. 111-127.
- Naeim, F, A Alimoradi y S Pezeshk (2004), “Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms”, *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, pp. 413–426.
- Nishenko, S P y S K Singh (1987), “The Acapulco-Ometepec, México earthquake of 1907-1982: evidence for a variable recurrence history”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 4, pp. 1359-1367.
- Nojima, N y H Kameda (1988), “Simulation of risk-consistent earthquake motion”, *Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto, Japan, II, pp. 95-100.
- 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 Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 41, 24-42.
- Ordaz, M, J Arboleda y S K Singh (1995), “A scheme of random summation of an empirical Green’s function to estimate ground motions from future large earthquakes”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, 1635-1647.
- Ordaz, M, E Miranda y J Avilés (2000), “Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF”, *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, CD, noviembre.
- Sadigh, K, C Y Chang, J A Egan, F Makdise y R R Youngs (1997), “Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 180-189.
- Shome, N, C A Cornell, P Bazurro y J E Carballo (1998), “Earthquakes, records and nonlinear responses”, *Earthquake Spectra*, Vol. 14, No. 3, pp. 469-500.
- Shome, N y C A Cornell (1999), “Probabilistic seismic hazard demand analysis of nonlinear structures”, *Reliability of Marine Structures Programs*, Report No. RMS-35, Dept. of civil Eng., Stanford University, Stanford, CA.
- Silva W, N Gregor y B Darragh (1999), “Near fault motions”, *Report for PG&E PEER*.
- Singh, S K, R Apsel, J Fried y J N Brune (1982), “Spectral attenuation of SH waves along the Imperial fault”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 72, No.6A, pp. 2003-2016.
- Wang, Y, X Liu y M Cheng (1991), “Study on the input of earthquake ground motion for time-history analysis of structures”, *Journal of Building Structures*, Vol. 12, No. 2, pp. 51–60.
- Zhai, C y L Xie (2007), “A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavorable real seismic design ground motions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 1009-1027.