



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"ACELEROGRAMAS DE DISEÑO
EN SITIOS AFECTADOS POR
VARIAS FUENTES SÍSMICAS"**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA
ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :
MIGUEL ÁNGEL JAIMES TÉLLEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. EDUARDO REINOSO ÁNGULO



CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2007

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Esteva Maraboto Luis**

Secretario: **Dr. García Pérez Jaime**

1^{er.} Vocal: **Dr. Reinoso Angulo Eduardo**

2^{do.} Vocal: **Dra. Ruiz Gómez Sonia Elda**

3^{er.} Vocal: **Dr. Ordaz Schroeder Mario Gustavo**

1^{er.} Suplente: **Dr. Aguirre Gonzalez Jorge**

2^{do.} Suplente: **Dr. Alamilla Lopez Jorge L.**

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

EDUARDO REINOSO ANGULO

FIRMA

*Para mi amada esposa Kochill Marlette
Lobato Valverde y mi adorada hija
Sara Faimés Lobato; las dos mujeres
que hacen sentido a mi vida*

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este trabajo no habría sido posible sin la preparación y apoyo provistos por la Universidad Nacional Autónoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la primera institución por enseñarme que el conocimiento y el valor del espíritu humano hacen seres humanos libres y trascendentes en el tiempo, y a la segunda por seguir impulsando la investigación en este país.

Al Instituto de Ingeniería, por ser la impulsora en la investigación científica teórica y aplicada de la ingeniería en México, y por permitirme llegar todos los días durante tres años al cubículo 102 y realizar de manera exitosa este documento.

Al Dr. Eduardo Reinoso Angulo, por el incansable apoyo y los consejos que hicieron posible concluir este trabajo. Asimismo, por su fina atención antes, durante y después del doctorado.

Al Dr. Mario Ordaz Schroeder, por sus valiosos y atinados consejos para llevar a buen término este documento.

Al Dr. Luis Esteva Maraboto, por su paciencia y finos comentarios técnicos al respecto.

A la Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez, por sus observaciones al realizar la revisión de este documento.

A Dr. Jaime García Pérez, Dr. Jorge L. Alamilla Lopez y Dr. Jorge Aguirre González por la revisión exhaustiva del documento y sus comentarios atinados al respecto.

A todos mis amigos del Instituto de Ingeniería (Omar, Cesar, Jorge, Arturo, Esteban, Carlos, Marco, Vicente, July y Maurico y los que me falten por mencionar.); de quienes aprecio su amistad, durante estos 3 años, un poco más, que tarde para terminar los estudios de doctorado.

A mi esposa, por todo el amor, paciencia e incansable ayuda para finalizar el doctorado. Gracias, por todo mi amor.

ÍNDICE

Introducción	i
RESUMEN	
1. Comparación de los sismos de subducción y falla normal en el valle de México	1
1.1 Sismos de subducción y falla normal	1
1.2 Leyes de atenuación para sismos de subducción y falla normal en la Ciudad de México	1
1.2.1 Ley de atenuación para sismos de subducción	2
1.2.2 Ley de atenuación para sismos de falla normal	2
1.3 Diferencias observadas en edificios instrumentados ante sismos de subducción y falla normal	2
1.3.1 Edificio PC	3
1.3.2 Edificio MJ	4
1.3.3 Edificio PI	4
1.4 Discusión	5
2. Métodos para estimar espectros de respuesta	14
2.1 Importancia de predecir espectros de respuesta dada una magnitud y distancia	14
2.2 Predicción de espectros de respuesta en sitios instrumentados	14
2.2.1 Método 1: Regresión bayesiana del espectro de respuesta	15
2.2.2 Método 2: Regresión bayesiana del espectro de amplitudes de Fourier y uso de la teoría de vibraciones aleatorias	15
2.2.3 Método 3: Regresión bayesiana del ER en CU y cociente espectral de respuesta	15
2.2.4 Método 4: Regresión bayesiana del EAF en CU, función de transferencia empírica y teoría de vibraciones aleatorias	16
2.3 Predicción de espectros de respuesta en sitios no instrumentados	16
2.4 Discusión	17
3. Funciones de Green empíricas modificadas por atenuación para sitios distantes de la fuente	18
3.1 Importancia de la técnica de simulación de funciones de Green empíricas	18
3.2 Descripción del método de funciones de Green empíricas modificadas por atenuación	18
3.3 Ejemplos	19
3.3.1 Sismo del 19 de Septiembre de 1985	19
3.3.2 Sismo del 14 de Septiembre de 1995	19
3.3.3 Sismo del 23 de Mayo de 1994	20
3.4 Discusión	20
4. Métodos para generar acelerogramas con propósitos de diseño estructural	31
4.1 Métodos existentes	31
4.2 Método 1: Escalar acelerogramas hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido	32
4.3 Método 2: Simular movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño	33

4.4 Método 3: Desarrollar funciones de atenuación generalizadas	33
4.5 Método 4: Usar método estocástico	33
4.6 Método 5: Utilizar técnica de funciones de Green empíricas	34
4.7 Discusión	34
5. Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas: el caso de terreno firme en la Ciudad de México	52
5.1 Importancia de los acelerogramas con propósitos de diseño	52
5.2 Metodología propuesta	53
5.3 Ejemplo de aplicación. Terreno firme de la Ciudad de México	53
5.3.1 Fuentes sísmicas	53
5.3.2 Espectro de peligro uniforme	54
5.3.3 Desagregación probabilística del peligro sísmico	55
5.3.4 Simulación de acelerogramas que ajusten al EPU	56
5.4 Discusión	58
CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	65

APÉNDICES

I. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS EN EL VALLE DE MÉXICO ANTE SISMOS DE SUBDUCCIÓN Y DE FALLA NORMAL. Por Miguel A. Jaimes y Eduardo Reinoso. *Aceptado en la Revista de Ingeniería Sísmica*

II. COMPARISON OF METHODS TO PREDICT RESPONSE SPECTRA AT INSTRUMENTED SITES GIVEN THE MAGNITUDE AND DISTANCE OF AN EARTHQUAKE. Por Miguel A. Jaimes, Eduardo Reinoso y Mario Ordaz. *Aceptado en el Journal of Earthquake Engineering*

III. EMPIRICAL GREEN'S FUNCTIONS MODIFIED BY ATTENUATION FOR SOURCES LOCATED AT INTERMEDIATE AND FAR DISTANCES FROM THE ORIGINAL SOURCE. Por Miguel A. Jaimes, Eduardo Reinoso y Mario Ordaz. *Aceptado en el Journal of Earthquake Engineering*

IV. A PROPOSAL TO OBTAIN DESIGN ACCELEROGRAMS AT SITES AFFECTED BY SEVERAL SEISMIC SOURCES: THE CASE OF HARD SOIL IN MEXICO CITY. Por Miguel A. Jaimes y Eduardo Reinoso. *Enviado al Earthquake Spectra*

INTRODUCCIÓN

En algunos casos, especialmente cuando es necesario evaluar la respuesta en el rango inelástico de estructuras importantes o los contenidos no estructurales, no es suficiente sólo definir el movimiento sísmico en términos de un espectro de diseño que consideran fuerzas relacionadas a parámetros de respuesta máxima como la aceleración espectral y el desplazamiento. Estos parámetros no siempre tienen una correlación directa con pérdida y 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 ser considerado. Por ello, deben usarse acelerogramas en el diseño de estructuras importantes y complejas como las presas, 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. Desgraciadamente, los códigos disponibles y manuales son vagos y solo mencionan que los acelerogramas deben ser compatibles con el espectro de diseño y apropiados a la situación. El criterio implementado por los reglamentos actuales no contiene información suficiente para los ingenieros, por lo que ellos no pueden usar métodos prácticos para generar acelerogramas de diseño y terminan usando cualquiera que esté disponible y, en muchos casos, poco útil para la estructura que ellos están analizando.

En este trabajo se presentan criterios encaminados a obtener acelerogramas con propósitos de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas.

En el **Capítulo 1** se presenta la importancia para los ingenieros de usar acelerogramas para analizar sus estructuras, considerando que cada sitio es afectado por muchas fuentes sísmicas, y por lo tanto se necesitan varios acelerogramas para predecir la respuesta que la estructura tendrá en su vida útil. Es más, es posible esperar movimientos sísmicos diferentes debido a las variaciones e incertidumbres en los parámetros sismológicos. Se estiman leyes de atenuación para terreno firme (CU) y dos sitios en zona de lago (SCT y CD) de la Ciudad de México ante sismos de subducción y falla normal. Posteriormente, se realiza un estudio comparativo del comportamiento que presentan algunas estructuras desplantadas en distintos sitios del valle de México mediante la aplicación de un modelo simplificado ante eventos sísmicos simulados y registrados de subducción y falla normal. Se usa el método de simulación de funciones de Green empíricas. Se analiza el comportamiento elástico estructural considerando dos tipos de deformación lateral: como viga de flexión y como viga de cortante, y se comparan los resultados en términos de los espectros de respuesta inelásticos, de la energía de entrada y de la energía histéretica normalizada de un sistema de un grado de libertad (1GDL). Los resultados muestran que un sismo de falla normal, debido al mayor contenido de alta frecuencia, provoca que los modos superiores de la estructura tengan mayor participación, lo que origina mayores intensidades en estructuras de periodo corto. Esto podría provocar mayores daños tanto en el edificio como en sus contenidos con respecto a un sismo de tipo subducción. Para fines

prácticos, se recomienda utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de falla normal y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar.

En el **Capítulo 2** se estudian métodos para obtener espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en un sitio. El estudio tiene la finalidad de determinar leyes de atenuación tanto en terreno firme como en terreno blando, que nos permitan determinar el peligro sísmico en el sitio. Primero, se comparan cuatro métodos, todos basados en regresiones Bayesianas, para predecir espectros de respuesta en sitios instrumentados, localizadas en zona de lomas y de lago en la Ciudad de México, que hayan registrado varios sismos recientes. Las regresiones se construyen en función de magnitud y distancia cercana al área de ruptura del sismo, usando más de 20 sismos registrados desde 1964. Los cuatro métodos son: (1) una regresión con espectros de respuesta observados; (2) una regresión con espectros de amplitudes de Fourier observados y uso de la teoría de vibración aleatorias para estimar los espectros de respuesta, (3) una regresión de los espectros de respuesta observados en la estación de zona de lomas de referencia multiplicada por el cociente espectral de respuesta; y (4) una regresión con los espectros de amplitudes de Fourier en la zona de lomas de referencia, multiplicado por la función de transferencia empírica y el uso de la teoría de vibración aleatorias para estimar espectros de respuesta. Segundo, se explica un método para obtener leyes de atenuación en sitios de terreno blando instrumentados y no instrumentados basados en leyes de atenuación existentes de terreno firme.

En el **Capítulo 3** se estudia la técnica de funciones de Green empíricas para obtener historias de tiempo de aceleración para ser usadas en un diseño sísmico que sea consistente con un escenario sísmico, definido, por ejemplo, en términos de la magnitud máxima creíble localizada a una distancia determinada. Se presenta un esquema para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación. Los cuatro factores considerados son: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Las intensidades calculadas con el método de simulación son comparadas con sismos registrados de tipo subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). Se presentan con datos de sismos mexicanos que el esquema planteado muestra una buena aproximación entre movimientos observados y simulados en sitios intermedios y distantes de la fuente sísmica.

En el **Capítulo 4** se comparan cinco métodos para obtener acelerogramas con propósitos de diseño. Los métodos son: (1) escalando acelerogramas existentes en el sitio hasta un nivel requerido de intensidad, (2) simulando movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño o un espectro de respuesta requerido, (3) usando funciones de atenuación generalizada, (4) aplicando un método estocástico y (5) usando la técnica de simulación de funciones de Green empíricas. Se usan datos del sismo del 19 de Septiembre de 1985 para comparar la aproximación entre los movimientos observados y calculados con cada uno de los métodos.

En el **Capítulo 5** se estudia cómo obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Para ello, primero se calcula el peligro sísmico probabilístico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) para determinar las fuentes sísmicas principales que afectan al sitio. Y posteriormente, realizando una evaluación de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, DPSHA) obtenemos los valores de magnitud y distancia más probables para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa excedencia dada. Para aplicar el PSHA y la DPSHA en un sitio es necesario contar con una (o varias) ley(es) de atenuación de la(s) región(es) sísmica(s) que afecta(n) al sitio. Por otro lado, para generar los movimientos en estos sitios se usa la técnica de simulación de funciones de Green empíricas modificada para tomar en cuenta la atenuación.

Finalmente, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo como ejemplo el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un caso excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas.

Al final de cada uno de los capítulos de la tesis se presenta una discusión sobre las limitaciones y posibles trabajos que se sugiere deben ser realizados.

El contenido de este trabajo, está centrado principalmente en los apéndices, en ellos se muestran estudios detallados de los tópicos que se presentan en cada uno de los capítulos. Los textos presentados en los apéndices, representan algunos artículos arbitrados, de los cuales algunos han sido aceptados para su publicación en revistas de circulación nacional e internacional, y otros se encuentran enviados. Debido a los fines del presente estudio se consideró adecuado incluirlos.

RESUMEN

En este trabajo se muestra que un sismo de falla normal, debido al mayor contenido de alta frecuencia, provoca que los modos superiores de estructuras ubicadas en el Valle de México tengan mayor participación, lo que origina mayores intensidades en estructuras de periodo corto. Esto podría provocar mayores daños tanto en el edificio como en sus contenidos con respecto a un sismo de tipo subducción. Se recomienda utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de falla normal y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar. Por lo tanto, se estudia en el trabajo cómo obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Para ello, primero se realiza un análisis probabilístico del peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) para determinar las principales fuentes sísmicas que afectan al sitio. Posteriormente, realizando una evaluación de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, DPSHA) obtenemos los valores más probables de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa de frecuencia dada. Pero para aplicar el PSHA y la DPSHA en un sitio es necesario contar con una (o varias) ley(es) de atenuación representativa(s) de la(s) región(es) sísmica(s) que afecta(n) al sitio. Por ello, se estudian métodos para obtener intensidades espectrales en sitios instrumentados y no-instrumentados dada una magnitud y distancia. Por otro lado, para generar los movimientos, dada una magnitud y distancia, en estos sitios se plantea y se usa una expresión para modificar la función de Green empírica por atenuación en sitios distantes de la fuente sísmica. Finalmente, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo como ejemplo el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un caso excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas.

Capítulo 1

Comparación de los sismos de subducción y falla normal en el valle de México

En este capítulo se señalan algunas diferencias que existen entre los sismos de subducción y de profundidad intermedia. Se estiman leyes de atenuación para CU, SCT y CD en la Ciudad de México ante sismos de subducción y falla normal. Se estudia el comportamiento de algunos edificios instrumentados de la Ciudad de México ante este tipo de eventos sísmicos. Las diferencias, como se observará, resultan relevantes en el comportamiento que tendrá la estructura durante su vida útil. Por ello, se recomienda, utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de profundidad intermedia y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar en estructuras y contenidos de la Ciudad de México.

1.1 Sismos de subducción y falla normal

Los sismos de subducción son los eventos sísmicos más estudiados en México por su frecuencia y magnitud y por la gran probabilidad de que pueda ocurrir en un futuro no lejano un evento sísmico que podría superar lo ocurrido en 1985. Sin embargo, a lo largo de la historia se han presentado algunos eventos al interior del país que liberan energía no por interacción entre las placas tectónicas como ocurre en los sismos de subducción sino asociados a un mecanismo de falla normal. Estos, en algunas ocasiones, han provocado no solamente daños estructurales y económicos, sino también la pérdida de vidas humanas; ejemplo de ello son los sismos de Orizaba, Veracruz ($M_w=7.0$) en 1973, el de Huajuapán de León ($M_w=7.0$) en 1980 y más recientemente los del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.5$), 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$) también en el mismo municipio de Huajuapán de León, 30 de septiembre de 1999 ($M_w=7.5$) en Oaxaca y 21 de julio de 2000 ($M_w=5.9$) en Puebla.

Existen evidencias históricas y avances recientes que muestran las diferencias entre los sismos de tipo subducción y profundidad intermedia. Estudios detallados de la fuente indican que el tipo de falla, caída de esfuerzos y magnitud provoca que los sismos de falla normal sean más energéticos que los sismos de subducción. Además, la propagación de las ondas de los sismos de subducción difiere de los sismos de falla normal (Furumura y Singh, 2002), donde la atenuación de los sismos de falla normal es mayor que la de los eventos de subducción (Singh, 2003). Como resultado de estas diferencias, el movimiento en la ciudad de México es muy distinto ante ambos eventos, reflejándose ésto no sólo en el contenido de frecuencias donde los sismos de falla normal presentan un mayor contenido de alta frecuencia con respecto a los de subducción, sino también en la duración ya que los sismos de subducción son más largos que los sismos de falla normal. Ante estas diferencias se puede esperar que los efectos que provocan los movimientos de subducción y falla normal en las estructuras sean diferentes.

1.2 Leyes de atenuación para sismos de subducción y falla normal en la Ciudad de México

Existen diferentes maneras de estimar espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en sitios instrumentados y no instrumentados. En el capítulo 2 y apéndice II de este trabajo se presenta un estudio detallado de algunos métodos para obtener leyes de atenuación espectral y sus incertidumbres

para estimar la aceleración espectral. A continuación, se presentan coeficientes obtenidos de tal forma que tales coeficientes presenten las menores incertidumbres (Método 1), debido a que se incluyen efectos de sitio de forma directa, usando datos observados. Consiste en el uso de una regresión lineal bayesiana (Reyes, 1999) usando la siguiente forma funcional:

$$(1.1)$$

Donde a es la aceleración espectral en el sitio, T es el periodo de un sistema de un grado de libertad, R es la distancia más corta al área de ruptura, α y β son los coeficientes a ser estimados, M_w es la magnitud, M_{ref} es la magnitud de referencia (en este trabajo se consideró $M_{ref} = 6.0$ y 5.0 para sismos de subducción y falla normal, respectivamente) y σ es el error estimado aleatorio, asumido para ser normalmente distribuido.

1.2.1 Ley de atenuación para sismos de subducción

En el apéndice II (Tabla 1) se muestran las características de los sismos de tipo subducción usados y los datos disponibles en las tres estaciones en la Ciudad: Ciudad Universitaria (CU), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y Central de Abastos (CD). Así mismo, en el apéndice II se presenta una descripción detallada de la obtención de los coeficientes. En la Tabla 1.1 se muestra los coeficientes obtenidos para los registros del apéndice II (sitio CU, SCT y CD), los cuales fueron obtenidos con más datos y, por lo tanto, son más confiables que aquellas obtenidas publicadas en previos trabajos. La Figura 1.1 ilustra la predicción de un espectro hipotético para una magnitud de $M_w=8.2$ y una distancia de $R=278$ km, así como el sismo registrado durante el evento del 19 de Septiembre de 1985, usando recientes expresiones en los sitios estudiados. Se puede observar que el espectro de respuesta hipotético muestra mayores intensidades espectrales que el observado del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Por lo tanto, como es bien sabido, mayores intensidades que el sismo de 1985 podrían presentarse en la Ciudad de México.

1.2.2 Ley de atenuación para sismos de falla normal

Para sismos de falla normal se usaron más de 10 sismos de falla normal registrados en cada uno de los sitios estudiados. En la Tabla 1.2 se muestran las características de los sismos usados y datos disponibles para las tres estaciones antes mencionadas. En la Tabla 1.3 se presentan los coeficientes obtenidos para los registros de la Tabla 1.2, los cuales fueron obtenidos con el Método 1 de regresión bayesiana presentado en apéndice II. La Figura 1.2 ilustra la predicción del espectro de respuesta (amortiguamiento crítico del 5%) para una magnitud de $M_w=7.0$ y una distancia epicentral de $R=137$ km; también se señala el espectro de respuesta para el sismo del 21 de Julio de 2000 ocurrido en Copalillo Puebla. Se observa mayores intensidades espectrales en el escenario de un sismo de falla normal, principalmente en periodo corto ($T < 1$ seg) para terreno firme, con respecto al escenario presentado de tipo subducción. Por lo tanto ambos tipos de eventos deben ser considerados cuando se utilicen acelerogramas con propósitos de diseño.

1.3 Diferencias observadas en edificios instrumentados ante sismos de subducción y falla normal

En un estudio previo (Jaimes y Reinoso, 2006a) se detectaron diferencias en los espectros de respuesta elástica e inelástica, energía de entrada y energía de histéresis ante los eventos de subducción y falla normal. Por ello se estudiaron algunos edificios instrumentados que tuvieran registrados en sus diferentes niveles eventos ocurridos en México entre los años de 1994 y 2000 debido a sismos de

subducción y falla normal. Las respuestas observadas se comparan con las calculadas por medio un método simplificado (Miranda y Taghavi, 2005) con la finalidad de observar la respuesta en otros niveles de los edificios donde no se tiene instrumento debido a que en algunos casos sólo se cuenta con registros en la azotea y se desconoce cómo se comporta en pisos intermedios. Para ello se determinan los parámetros requeridos por el modelo como es el periodo de la estructura, T , amortiguamiento, ζ , y el parámetro α . El apéndice I (Tabla 1) contiene datos de los eventos y parámetros utilizados al emplear el método simplificado. Los parámetros se calculan para cada estructura y en cada dirección, es decir, que estos varían de evento a evento debido a que se ha observado que el periodo y amortiguamiento de algunas estructuras que han presentado comportamiento no lineal o han sido reestructuradas se han modificado en los últimos diez años. Los edificios son: PC y MJ en zona de lago y el edificio PI en terreno firme de la Ciudad de México.

1.3.1 Edificio PC

Es una estructura de 18 niveles formada originalmente por marcos de concreto reforzado en las dos direcciones; posteriormente la dirección transversal y longitudinal fueron reforzados con muros de concreto que se extienden desde la losa de sótano hasta la azotea (Pavón y Rodríguez, 1990). Se encuentra desplantado en terreno blando de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2.2 segundos. El edificio presenta un periodo estructural promedio de 2.63 y 2.71 en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. En la Tabla 1 del apéndice I se presentan los parámetros utilizados para obtener la respuesta mediante el método simplificado ante los dos eventos sísmicos estudiados.

En la Figura 1.3 se muestran las aceleraciones máximas observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua), ante los sismos de subducción del 10 de diciembre de 1994 ($M_w=6.6$, $R=290$ km) y de falla normal del 21 de julio de 2000 ($M_w=6.3$, $R=140$ km). Se observa que a pesar de que las aceleraciones máximas del suelo son similares para ambos sismos (Tabla 1 del apéndice I), las amplificaciones, PFA/PGA, son mayores en los diferentes niveles para el evento de subducción (10/Dic/94) con respecto al de falla normal (21/Jul/00) por las razones expuestas en las figuras 1 y 2. El modelo simplificado permite tener una mejor apreciación de estas diferencias y de los efectos que tienen estos dos tipos de eventos en la estructura. Estas diferencias son debidas a que los sismos de falla normal para estructuras con periodo estructural mayor al periodo del suelo (en este caso el periodo promedio de la estructura tanto en dirección longitudinal, $T = 2.63s$, como en dirección transversal, $T \approx 2.71s$, resultan mayores al del periodo del suelo, $T_s \approx 2.2s$) provocan que los modos superiores tengan mayor participación en la respuesta del edificio.

Lo anterior también se aprecia en la Figura 1.4 en la que se presentan los espectros de respuesta en diferentes niveles instrumentados ($h/H=1.00$, 0.63 , 0.32) y no instrumentados ($h/H=0.75$ y 0.15) del edificio PC. Se observa cómo la respuesta observada es similar a la calculada con el método simplificado en los niveles instrumentados lo que valida el uso del método para extrapolar a pisos no instrumentados. Por otro lado se observa que ante el evento de falla normal (21/07/00) la participación de los modos superiores (segundo y tercer modo principalmente) son mayores inclusive que la del primer modo de la estructura (excepto en el nivel $h/H \approx 0.75$ donde se presenta un punto de inflexión de los modos superiores a este nivel) en comparación con el sismo de subducción (10/12/94) donde el primer modo es dominante en ambas direcciones del edificio. Por lo tanto la mayor participación de los modos superiores no sólo podría generar mayores distorsiones en pisos superiores sino además un mayor daño en los contenidos de los edificios debido a que son mayores las intensidades en los diferentes niveles en periodos menores con respecto al modo fundamental de la estructura o que, por

ejemplo, un contenido con periodo de 0.8s ubicado en cualquier piso (excepto nivel $h/H \approx 0.75$) sufra mayores demandas para un sismo de falla normal que para uno de subducción.

1.3.2 Edificio MJ

Está ubicado cerca de la estación del metro Juárez. Tiene 7 niveles. La estructura original estaba formada por marcos de concreto reforzado y posteriormente fue reforzada con encamisado de columnas con placas de acero y colocando contraventeos de acero en ambas direcciones y muros de concreto en la dirección longitudinal. El edificio está desplantado en terreno blando de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2 segundos. En la Tabla 2 del apéndice 1 se indica los parámetros empleados al aplicar el método simplificado para reproducir adecuadamente la respuesta. La estructura tiene un periodo promedio de 0.65 y 0.68 en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente, ante los dos eventos sísmicos analizados (ver Figura 1 del apéndice I) del 14 de septiembre de 1995 ($M_w=7.4$, $R=260$ km) de subducción y el del 15 de junio de 1999 ($M_w=6.5$, $R=230$ km) de falla normal. Estos dos eventos se consideraron en esta estructura porque se presentaron después de que el edificio fue reforzado en el año de 1992 con los muros de concreto.

En la Figura 1.5 se presentan al igual que en la Figura 1.3 pero para el edificio MJ, las aceleraciones observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua). En esta figura se puede observar que la respuesta obtenida por medio del método simplificado (línea continua) con respecto al observado (puntos) considerando sólo tres parámetros está bien aproximada, y que gracias al método simplificado se tiene una buena idea del tipo de configuración que presentó la estructura ante los dos eventos. La relación PFA/PGA es mayor para el evento de falla normal a pesar que el sismo de subducción presenta una mayor aceleración del suelo ($PGA=0.32m/s^2$) que el de falla normal ($PGA=0.21m/s^2$); esto debido a que el contenido de alta frecuencia del sismo de falla normal provoca en este caso intensidades espectrales similares al sismo de subducción (ver Figura 5 del apéndice I). También se observa lo que anteriormente se había mencionado (Figura 4 del apéndice I) que cuando el periodo de la estructura es menor que el periodo del suelo, el modo que más participa en la estructura debido a sismos de subducción y falla normal es el primer modo. Es decir, como el edificio tiene un periodo de $T \approx 0.65s$ en la dirección longitudinal y un periodo de $T \approx 0.68s$ en la dirección transversal (ambos menores que el periodo del suelo, $T_s \approx 2s$) provoca que predomine el primer modo del edificio.

En la Figura 1.6 se presentan los espectros de respuesta de piso de la azotea, único piso instrumentado en el edificio; se muestra como la respuesta obtenida con el método analítico (línea gruesa) es casi idéntica a la respuesta observada (línea delgada) y como es el primer modo ($T \approx 0.65s$ y de $T \approx 0.68s$) el que tiene mayor participación para ambos tipos de eventos.

1.3.3 Edificio PI

Esta estructura está integrada por cuatro torres (I, II, III y IV) de marcos de concreto reforzado con una altura mayor de 60 m, unidas en los 6 niveles inferiores. Las torres I y II fueron construidas en 1982 mientras que las III y IV datan de 1992. El edificio se encuentra instrumentado en las torres I y IV. Está desplantado en terreno firme de la ciudad de México. Este edificio presenta un periodo estructural aproximado de 1.485 y 1.48 segundos en la torre IV y de 1.68 y 1.92 segundos en la torre I, en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Se analizó la torre IV porque se contaba con información sobre los dos tipos de sismos que se han manejado en el trabajo. La Tabla 2 del apéndice I presenta los parámetros utilizados para reproducir por medio del método simplificado esta estructura

ante los dos eventos analizados (Figura 1 del apéndice I): 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$, $R=590$ km) de subducción y el del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.2$, $R=210$ km) de falla normal.

En la Figura 1.7 se presenta al igual que en las figuras 1.3 (edificio PC) y 1.5 (edificio MJ) los cocientes PFA/PGA con respecto a su altura normalizada (h/H) tanto los observados (puntos) como los calculados (línea continua) para el edificio PI. Las observaciones hechas para los edificios desplantados en terreno blando son también válidas en terreno firme. La estructura ante el evento de falla normal presenta mayor participación de los modos superiores con respecto al de subducción. La mayor participación de los modos superiores en el sismo de falla normal (23/may/94) puede provocar mayores movimientos laterales en niveles superiores con respecto al observado de subducción (09/oct/94) como se indica en la figura con una línea horizontal para ambas direcciones del edificio. Se observa cómo la amplificación en pisos superiores es mayor ante el sismo de falla normal con respecto al de subducción.

En la Figura 1.8 se presenta la respuesta tanto en niveles donde hay registro ($h/H \approx 1.00$ y 0.325) como en donde no lo hay ($h/H \approx 0.75$ y 0.15) del edificio PI (línea delgada, observada, y línea gruesa, calculada con el método simplificado). En esta figura se aprecia al igual que en el edificio PC cómo cuando la estructura tiene un periodo estructural mayor al periodo del suelo da como resultado que los modos superiores tengan mayor participación ante este tipo de eventos (excepto en el nivel $h/H \approx 0.75$ donde no hay contribución de modos superiores debido a que coincidentemente se presenta en esa altura un punto de inflexión). Esto implica, no sólo posibles daños en pisos superiores sino mayor daño en los contenidos del edificio.

1.4 Discusión

En este trabajo se presentan dos leyes de atenuación para CU, SCT y CD de la Ciudad de México ante sismos de tipo subducción y falla normal. La ley de atenuación obtenida para terreno firme puede ser utilizada para predecir espectros respuesta o leyes de atenuación en sitios instrumentados o no instrumentados de acuerdo a lo que se presentará en el capítulo 2 de este trabajo.

Además, se presentaron las diferencias en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en el valle de México ante dos tipos de eventos: subducción y falla normal. Resultados de este capítulo junto con los presentados en el apéndice I muestran diferencias importantes en periodos cortos ($T < 1.0s$) en los espectros de respuesta inelásticos, en la energía de entrada y en la energía histéresis normalizada de sistemas de 1GDL sobre todo en terreno firme, teniendo mayor intensidad los sismos de falla normal con respecto a los de subducción. Estos resultados indican que se pueden esperar mayores demandas inelásticas en las estructuras ante sismos de profundidad intermedia.

Se estudiaron eventos sísmicos registrados en edificios instrumentados tanto en terreno firme como en zona de lago de la ciudad de México. Se encuentra que los modos superiores pueden tener una gran influencia cuando los sismos son de falla normal. Estos modos superiores provocan una mayor intensidad en periodos cortos que podrían afectar a los contenidos en las estructuras y causar daños en pisos superiores.

Las amplificaciones en los pisos superiores con respecto al suelo varían entre 2 y 6 veces, siendo mayores las amplificaciones en estructuras con $T < 1s$ ante sismos de falla normal y para estructuras con $T > 1s$ debido a sismos de subducción. También, es importante considerar el tipo de estructuración del edificio: ante sismos de falla normal para estructuras con periodos mayores a un segundo las amplificaciones en la azotea son mayores para estructuras que se deforman como vigas a flexión

(estructuras con muros o contravientos) con respecto a estructuras que se deforman como vigas de cortante (marcos estructurales).

El riesgo sísmico de estructuras en sitios del valle de México está prácticamente dominado por los eventos de subducción, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en este trabajo se puede esperar que los sismos de falla normal causen daños en estructuras con periodos estructurales $T < 1.0s$ en terreno firme y en zona de lago en periodos alrededor del segundo modo fundamental del suelo. También se pueden esperar mayores distorsiones en pisos superiores y daños en contenidos de edificios en los diferentes niveles del edificio debido a este tipo de sismos. Para fines prácticos, es muy importante utilizar acelerogramas de diseño de ambas fuentes sísmicas en la evaluación de la respuesta estructural debido a que no sólo se debe contemplar el uso de grandes sismos de subducción sino también considerar los efectos que tienen los sismos de falla normal en la respuesta estructural.

Tabla 1.1. Valores de $\alpha_i(T)$ obtenidos para CU, SCT y CD (Componente EW) para sismos de subducción

T	CU				SCT				CD			
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4
0.001	5.6897	1.1178	-0.50	-0.0060	5.7962	1.6328	-0.50	-0.0044	6.1982	0.8933	-0.50	-0.0031
0.2	6.5911	0.8874	-0.50	-0.0067	6.0527	1.5841	-0.50	-0.0046	6.3205	0.8797	-0.50	-0.0032
0.4	6.3144	1.0139	-0.50	-0.0059	6.2063	1.5638	-0.50	-0.0046	6.8290	0.8348	-0.50	-0.0039
0.6	6.6483	1.1018	-0.50	-0.0065	6.6180	1.4293	-0.50	-0.0042	6.8249	0.7844	-0.50	-0.0036
0.8	6.8495	1.3343	-0.50	-0.0076	6.3107	1.6049	-0.50	-0.0044	7.4872	1.0401	-0.50	-0.0055
1	6.4316	1.3155	-0.50	-0.0064	6.2809	1.5633	-0.50	-0.0043	7.4524	0.7789	-0.50	-0.0038
1.2	6.7093	1.3152	-0.50	-0.0072	6.4015	1.4574	-0.50	-0.0034	8.5807	0.7605	-0.50	-0.0062
1.4	6.0035	1.2168	-0.50	-0.0050	6.7468	1.3862	-0.50	-0.0035	7.4860	1.1000	-0.50	-0.0054
1.6	6.0507	1.2437	-0.50	-0.0051	6.8058	1.5075	-0.50	-0.0033	6.3268	1.0398	-0.50	-0.0024
1.8	5.6822	1.3034	-0.50	-0.0046	7.1556	1.5831	-0.50	-0.0037	6.0009	1.0704	-0.50	-0.0019
2	5.7883	1.3993	-0.50	-0.0056	7.4992	1.7803	-0.50	-0.0052	5.6852	0.9924	-0.50	-0.0007
2.2	5.5195	1.6160	-0.50	-0.0058	7.5028	1.8101	-0.50	-0.0062	5.8853	0.9743	-0.50	-0.0006
2.4	5.1604	1.4749	-0.50	-0.0048	6.9067	1.9633	-0.50	-0.0058	5.7522	0.8490	-0.50	0.0006
2.6	5.4283	1.6010	-0.50	-0.0061	6.4540	2.1780	-0.50	-0.0058	6.1640	0.8390	-0.50	0.0003
2.8	5.0573	1.4965	-0.50	-0.0049	6.4178	2.1542	-0.50	-0.0063	6.5639	0.9007	-0.50	-0.0007
3	4.5972	1.4695	-0.50	-0.0039	6.2336	1.9706	-0.50	-0.0061	6.3475	0.9989	-0.50	-0.0004
3.2	4.4303	1.5104	-0.50	-0.0038	5.7517	1.9212	-0.50	-0.0052	5.9176	1.1187	-0.50	0.0004
3.4	4.0981	1.5027	-0.50	-0.0031	5.4499	1.9488	-0.50	-0.0051	5.8643	1.2408	-0.50	-0.0001
3.6	3.7992	1.6018	-0.50	-0.0029	5.1882	1.9458	-0.50	-0.0050	6.1972	1.3262	-0.50	-0.0018
3.8	3.5164	1.7014	-0.50	-0.0029	5.0502	1.9379	-0.50	-0.0050	6.3375	1.5119	-0.50	-0.0033
4	3.2601	1.7098	-0.50	-0.0024	5.0775	1.9604	-0.50	-0.0055	6.2694	1.6623	-0.50	-0.0041
4.2	3.0349	1.6404	-0.50	-0.0020	4.7667	1.9258	-0.50	-0.0048	6.1002	1.7283	-0.50	-0.0044
4.4	2.9353	1.6219	-0.50	-0.0019	4.4999	1.8246	-0.50	-0.0042	5.8153	1.6830	-0.50	-0.0042
4.6	2.7737	1.5579	-0.50	-0.0016	4.2413	1.7518	-0.50	-0.0036	5.5407	1.6086	-0.50	-0.0038
4.8	2.6416	1.5223	-0.50	-0.0015	3.8406	1.7391	-0.50	-0.0027	5.1473	1.5643	-0.50	-0.0031
5	2.6246	1.5194	-0.50	-0.0018	3.5085	1.7430	-0.50	-0.0020	4.8717	1.5613	-0.50	-0.0028
5.2	2.4099	1.4851	-0.50	-0.0014	3.2950	1.7586	-0.50	-0.0017	4.7096	1.5826	-0.50	-0.0028
5.4	2.1372	1.4635	-0.50	-0.0008	3.2182	1.7798	-0.50	-0.0018	4.6660	1.5648	-0.50	-0.0029
5.6	2.0505	1.5243	-0.50	-0.0010	3.1702	1.7939	-0.50	-0.0019	4.6605	1.5547	-0.50	-0.0032
5.8	2.2973	1.6494	-0.50	-0.0022	3.1198	1.8428	-0.50	-0.0021	4.6512	1.5431	-0.50	-0.0035
6	2.6207	1.7533	-0.50	-0.0035	3.0442	1.8875	-0.50	-0.0023	4.5998	1.5379	-0.50	-0.0036

Tabla 1.2. Sismos de falla normal con $M > 5$ registrados en tres estaciones de la Ciudad de México

ID	Fecha	Ubicación	M	Lat.	Long.	Prof.	Distancia-CU	CU	SCT	CD
1	06/0764	Prof. Int. Oeste	6.7	18.03	100.77	55	179	✓	X	X
2	05/08/93	Prof. Int. Centro	5.2	17.429	98.337	54	229	✓	✓	✓
3	23/02/94	Prof. Int. Centro	5.8	17.75	97.27	75	267	✓	✓	✓
4	06/05/94	Prof. Int. Centro	5.2	18.39	97.98	57	163	✓	✓	✓
5	23/05/94	Prof. Int. Centro	6.2	18.02	100.57	50	206	✓	✓	✓
6	10/12/94	Prof. Int. Centro	6.4	17.98	101.52	50	288	✓	✓	✓
7	11/01/97	Prof. Int. Oeste	7.1	18.37	101.82	35	374	✓	✓	✓
8	03/04/97	Prof. Int. Centro	5.2	18.51	98.1	52	145	✓	✓	✓
9	22/05/97	Prof. Int. Oeste	6.5	18.37	101.82	54	298	✓	✓	✓
10	20/04/98	Prof. Int. Oeste	5.9	18.35	101.19	60	238	✓	✓	✓
11	15/06/99	Prof. Int. Centro	7	18.13	97.54	61	218	✓	✓	✓
12	21/06/99	Prof. Int. Oeste	6.3	18.15	101.72	53	296	✓	✓	✓
13	30/09/99	Prof. Int. Centro	7.4	16.03	96.96	47	435	✓	✓	✓
14	21/07/00	Prof. Int. Centro	5.9	18.11	98.97	50	136	✓	✓	✓
15	19/11/03	Prof. Int. Oeste	5.2	17.91	99.03	48	161	✓	X	X

Tabla 1.3. Valores de $\alpha_i(T)$ obtenidos para CU, SCT y CD (Componente EW) para sismos de falla normal

T	CU				SCT				CD			
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4
0.001	3.9822	1.8601	-0.50	-0.0089	4.9982	1.8612	-0.50	-0.0080	4.9371	1.8813	-0.50	-0.0081
0.2	5.1588	1.6227	-0.50	-0.0085	5.4049	1.8267	-0.50	-0.0081	5.3039	1.8433	-0.50	-0.0082
0.4	4.5776	2.0833	-0.50	-0.0095	4.3914	2.1447	-0.50	-0.0077	4.4212	2.1416	-0.50	-0.0077
0.6	3.7908	2.0602	-0.50	-0.0068	4.3804	2.0476	-0.50	-0.0050	3.9102	2.0466	-0.50	-0.0050
0.8	3.4864	2.1218	-0.50	-0.0067	3.7668	2.1042	-0.50	-0.0050	3.9480	2.1076	-0.50	-0.0050
1	3.4093	2.2389	-0.50	-0.0070	3.4934	2.2007	-0.50	-0.0048	3.9738	2.1947	-0.50	-0.0048
1.2	3.1589	2.4178	-0.50	-0.0080	3.6953	2.4140	-0.50	-0.0063	3.9959	2.4016	-0.50	-0.0062
1.4	3.0486	2.3648	-0.50	-0.0078	3.9241	2.4839	-0.50	-0.0071	3.7027	2.4837	-0.50	-0.0071
1.6	2.7950	2.3827	-0.50	-0.0071	4.0056	2.4311	-0.50	-0.0054	3.1368	2.4429	-0.50	-0.0055
1.8	2.1942	2.4009	-0.50	-0.0056	3.6492	2.4058	-0.50	-0.0035	2.6363	2.4217	-0.50	-0.0036
2	1.8208	2.5639	-0.50	-0.0056	3.4973	2.5002	-0.50	-0.0034	2.4793	2.5187	-0.50	-0.0035
2.2	1.6384	2.7180	-0.50	-0.0064	3.2653	2.6673	-0.50	-0.0045	2.7045	2.6188	-0.50	-0.0042
2.4	1.4967	2.6567	-0.50	-0.0063	2.8766	2.6325	-0.50	-0.0044	2.7993	2.6509	-0.50	-0.0045
2.6	0.9514	2.5784	-0.50	-0.0044	2.2959	2.6076	-0.50	-0.0036	2.7887	2.6248	-0.50	-0.0037
2.8	0.5323	2.6590	-0.50	-0.0034	1.7905	2.6466	-0.50	-0.0025	2.7816	2.6652	-0.50	-0.0026
3	0.5314	2.7761	-0.50	-0.0042	1.5722	2.7058	-0.50	-0.0028	2.7514	2.7230	-0.50	-0.0029
3.2	0.4063	2.7482	-0.50	-0.0035	1.1904	2.6437	-0.50	-0.0016	2.3728	2.6585	-0.50	-0.0017
3.4	0.4169	2.8840	-0.50	-0.0045	1.0794	2.8260	-0.50	-0.0030	2.3845	2.8399	-0.50	-0.0031
3.6	0.1969	2.9463	-0.50	-0.0044	0.8802	2.9128	-0.50	-0.0034	2.2473	2.9253	-0.50	-0.0035
3.8	0.1602	2.8693	-0.50	-0.0045	0.9200	2.8754	-0.50	-0.0039	2.2074	2.8847	-0.50	-0.0040
4	0.2030	2.7468	-0.50	-0.0042	0.9709	2.8097	-0.50	-0.0041	2.1431	2.8189	-0.50	-0.0041
4.2	0.0900	2.7475	-0.50	-0.0040	0.8448	2.8343	-0.50	-0.0042	1.9906	2.8412	-0.50	-0.0042
4.4	-0.2158	2.6860	-0.50	-0.0030	0.6834	2.8185	-0.50	-0.0040	1.8005	2.8265	-0.50	-0.0041
4.6	-0.3938	2.6205	-0.50	-0.0023	0.5266	2.7678	-0.50	-0.0035	1.6071	2.7767	-0.50	-0.0036
4.8	-0.6096	2.6079	-0.50	-0.0019	0.2821	2.7350	-0.50	-0.0030	1.2942	2.7432	-0.50	-0.0030
5	-0.7365	2.6365	-0.50	-0.0018	-0.0011	2.7269	-0.50	-0.0022	0.9029	2.7368	-0.50	-0.0023
5.2	-0.6405	2.6421	-0.50	-0.0022	-0.0398	2.6988	-0.50	-0.0022	0.8174	2.7111	-0.50	-0.0023
5.4	-0.6274	2.6346	-0.50	-0.0024	-0.0873	2.6779	-0.50	-0.0022	0.7622	2.6946	-0.50	-0.0023
5.6	-0.7390	2.5778	-0.50	-0.0020	-0.1773	2.6247	-0.50	-0.0018	0.6315	2.6435	-0.50	-0.0019
5.8	-0.8068	2.5131	-0.50	-0.0016	-0.2854	2.5423	-0.50	-0.0013	0.5131	2.5624	-0.50	-0.0014
6	-0.9892	2.4788	-0.50	-0.0009	-0.4616	2.4794	-0.50	-0.0006	0.3350	2.5013	-0.50	-0.0007

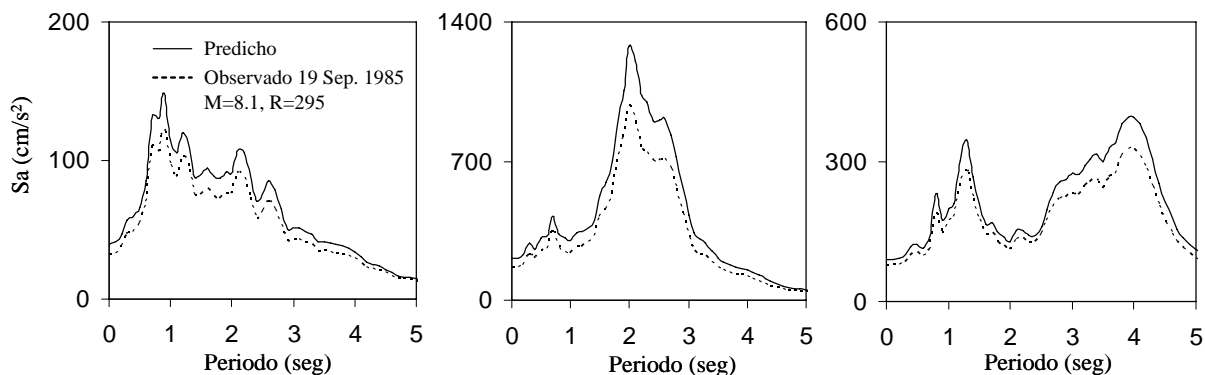


Figura 1.1 Comparación entre el espectro de respuesta de aceleración observado y calculado con la ley de atenuación de tipo subducción para una $M_w=8.2$ y $R=278$ km para a) CU, b) SCT y c) CD

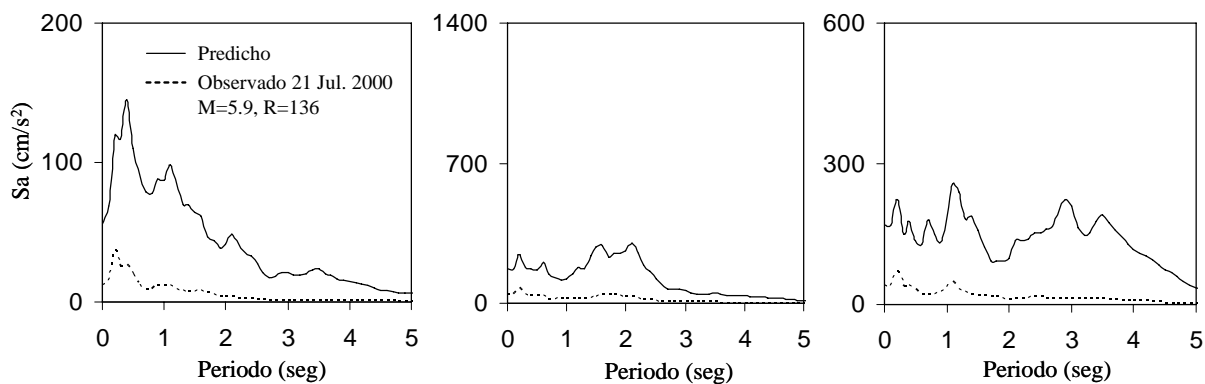


Figura 1.2 Comparación entre el espectro de respuesta de aceleración observado del evento del 21 de Julio de 2000 (línea discontinua) y calculado (línea continua) con la ley de atenuación de tipo falla normal para una $M_w=7.0$ y $R=137$ km para a) CU, b) SCT y c) CD

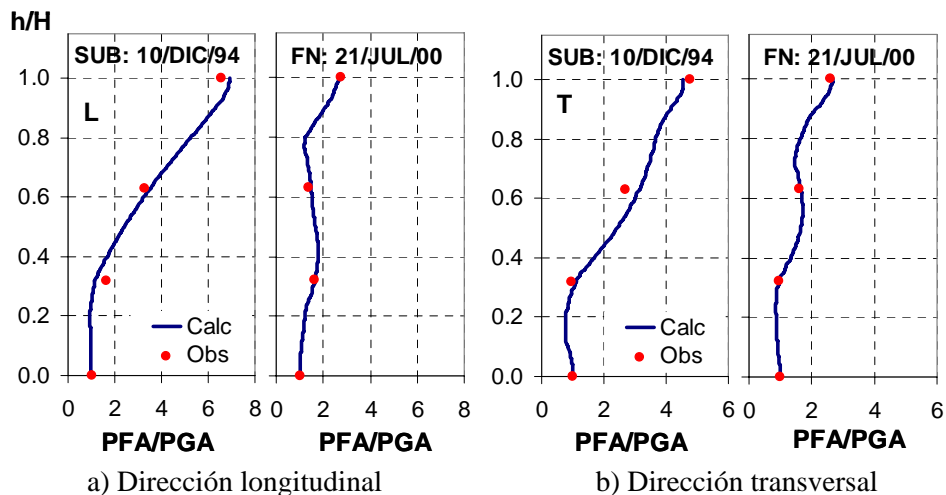


Figura 1.3. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PC ubicado en zona de lago

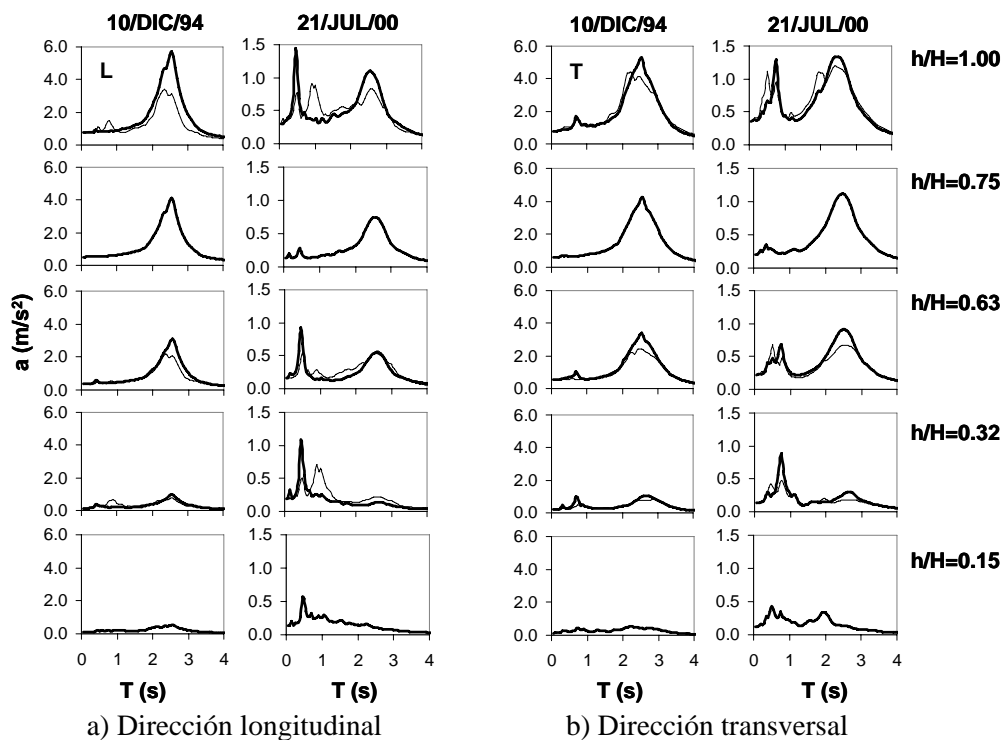


Figura 1.4. Respuesta en los diferentes niveles del edificio PC (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

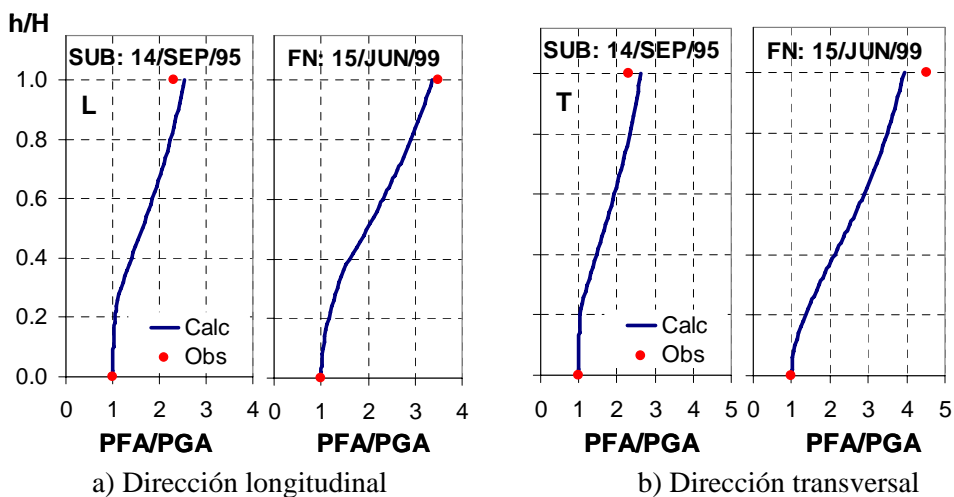


Figura 1.5. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio MJ ubicado en zona de lago

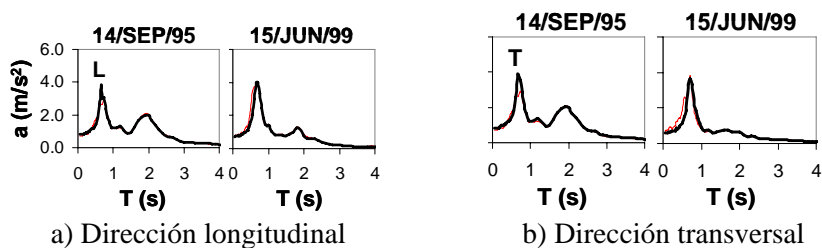


Figura 1.6. Respuesta en los diferentes niveles del edificio MJ (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

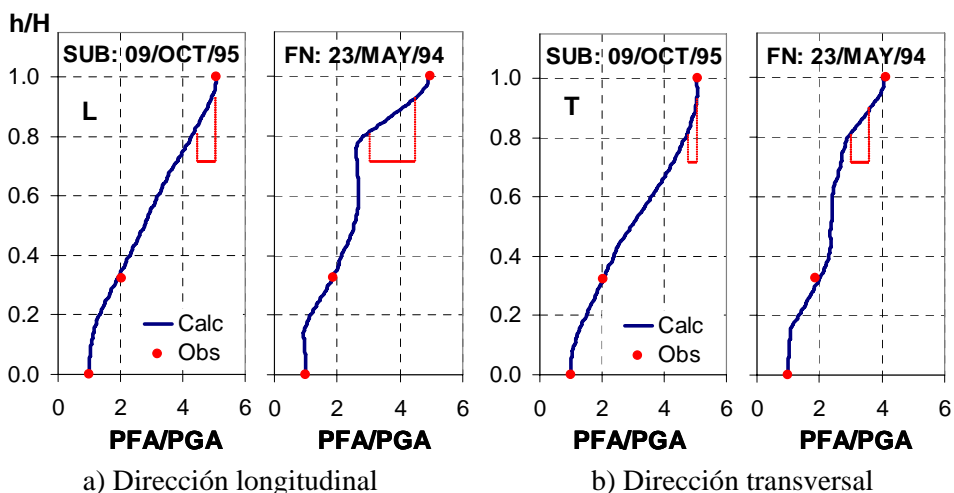


Figura 1.7. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PI ubicado en zona de lago

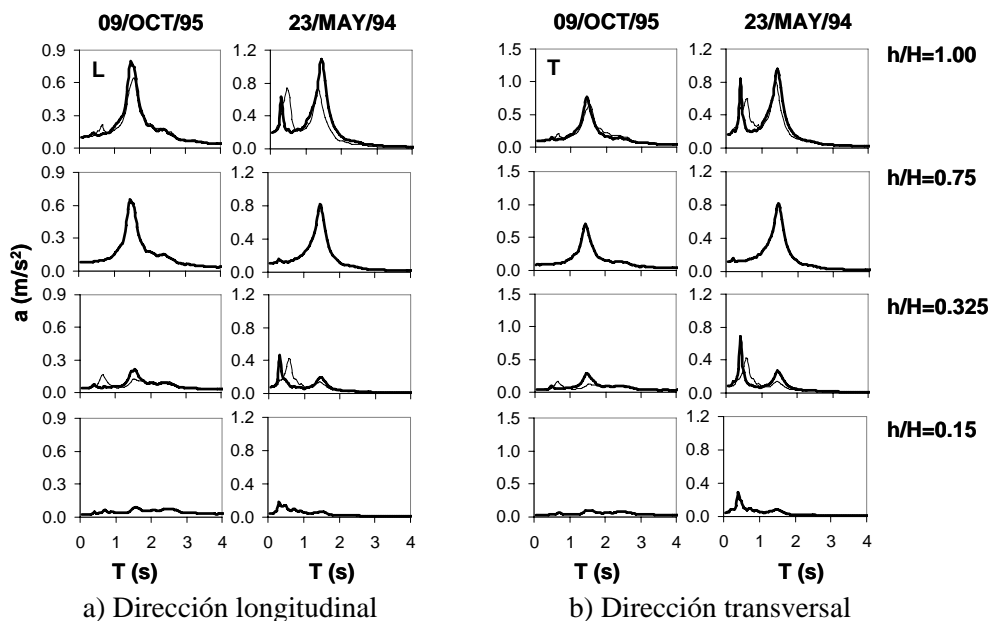


Figura 1.8. Respuesta en los diferentes niveles del edificio PI (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

Capítulo 2

Métodos para estimar espectros de respuesta

Estimar el movimiento del suelo sísmico es un importante paso en la anticipación de los efectos sísmicos en las estructuras y contenidos de las mismas. En este capítulo, primero se presentan cuatro métodos, todos basados en regresiones Bayesianas, para predecir espectros de respuesta en sitios instrumentados, localizadas en zona de lomas y de lago en la Ciudad de México, que ha registrado varios sismos recientes. Este trabajo ha sido publicado y se incluye en el apéndice II. Asimismo, se describe un método para obtener leyes de atenuación o espectros de respuesta para ser usado en sitios instrumentados y no instrumentados a través del uso de leyes de atenuación existentes espectrales de sitios en roca o terreno firme.

2.1 Importancia de predecir espectros de respuesta dada una magnitud y distancia

Para realizar un análisis probabilístico de peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA) en un sitio es necesario tener expresiones de atenuación las cuales relacionan, en términos probabilísticos, magnitud y distancia fuente-sitio con la medida de intensidad de interés, usualmente la aceleración máxima del suelo o aceleración espectral. Muchas de las relaciones de atenuación disponibles han sido construidos para sitios de terreno firme (*p.e.* Joyner y Boore, 1993; Sadigh, 1997; Abrahamson y Silva, 1997), varias relaciones de atenuación publicadas incluyen términos para ser usados en sitios generalmente definidos como “intermedio” o “suave”. Existen pocas leyes de atenuación para un sitio en particular (*p.e.* Atkinson, 2006), éstas han sido construidas usando registros de movimientos en ese sitio y que, en consecuencia, incluye los efectos de sitio particulares a éste estudiado (apéndice II).

Sin embargo, se está siendo común realizar PSHA para sitios específicos en los cuales los efectos de sitio pueden ser caracterizados de una manera más precisa que la clasificación genérica de “intermedio” y “suave”. En estos casos, la situación ideal es tener una sola relación de atenuación única para la estación la cual incluya correctamente los efectos de sitio apropiados. Escasas relaciones de este tipo están disponibles y, en general, los datos son insuficientes para construir una relación empírica.

2.2 Predicción de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en sitios instrumentados

Existen diferentes maneras para estimar el espectro de respuesta futuro en un sitio usando movimientos de suelo fuerte observados. A continuación, solo presentamos brevemente resultados de la aplicación de los cuatro métodos para predecir espectro de respuesta en la Ciudad de México en sitios instrumentados comparando sus incertidumbres. Los dos primeros métodos (Método 1 y 2) son aplicados a todas las estaciones mientras que los métodos 3 y 4 son solamente aplicados en los sitios de la zona del lago. En el apéndice II (Figura 1) se muestra un diagrama describiendo cada uno de estos métodos. Más detalles acerca de los métodos y resultados pueden ser vistos en el apéndice II y las referencias ahí contenidas.

2.2.1 Método 1: Regresión bayesiana del espectro de respuesta

El primero y uno de los más obvio (Método 1, ver apéndice II) es construir leyes de atenuación para estimar aceleraciones espectrales, esto implica el cálculo, a través de un método de regresión, de un conjunto de coeficientes para cada periodo estructural (*p.e.* Reyes, 1999; Joyner y Boore, 1993). En el apéndice II (Figuras 3 y 5) se presenta una comparación del espectro de repuesta observado (línea continua) con el espectro de respuesta estimado con la regresión bayesiana (línea discontinua) para el sitio CU en la primera y, SCT y CD en la segunda figura mencionada. En general, las estimaciones son aceptables. El error y la desviación estimada resultan muy bajos, como se señala en el apéndice II (Tabla 3). El Método 1 considera en forma directa los efectos de sitio (*p.e.* posibles efectos no lineales del suelo); éste es el que presenta menores incertidumbres.

2.2.2 Método 2: Regresión bayesiana del espectro de amplitudes de Fourier y uso de la teoría de vibraciones aleatorias

Una segunda manera (Método 2, ver apéndice II), es calcular relaciones de atenuación del espectro de amplitudes de Fourier para después estimar el espectro de respuesta usando teoría de vibraciones aleatorias, TVA (Cartwright and Longuett-Higgins, 1956; Reinoso *et al.*, 1992), un proceso que requiere también conocer la duración del movimiento fuerte. El Método 2 es similar al 1 y, quizás, lleva un poco más de tiempo. Pero, este ha sido útil para predecir espectro de respuesta en sitios con grandes efectos de sitio y poca o nula información acelerométrica, ha sido usado para obtener espectros de diseño para el código de la Ciudad de México, pérdidas esperadas que resultan útiles para el sector de seguros; este método fue usado debido a que el espectro de Fourier tiene restricciones teóricas. Es muy importante evaluar las incertidumbres de ambos métodos (Método 1 y 2) y decidir cual debe ser usado. En el apéndice II (Figuras 3 y 5) se muestran con línea delgada, resultados del Método 2 comparado con el espectro de respuesta observado (línea continua gruesa) y el espectro estimado con el Método 1 (línea discontinua). Se puede observar que las estimaciones son adecuadas y similares a las estimadas con el Método 1 para los sitios CU y SCT; sin embargo, para el sitio CD las diferencias entre los espectros del Método 2 y las observadas son mayores con respecto al Método 1. Esto podría deberse a efectos no lineales del suelo. Los cambios no lineales están muy claros en los espectros de respuesta, pero puede pasar inadvertido en los espectros de amplitudes de Fourier debido a la presencia de muchos picos o por el suavizado que se realiza al espectro de amplitudes de Fourier. Esto es por lo que el Método 1 es mejor que el Método 2 debido a que la regresión en el Método 1 captura directamente los efectos arriba mencionados. Otro factor, que podría influir en la predicción al usar el Método 2 en el sitio CD es el uso de TVA que considera un proceso estacionario.

2.2.3 Método 3: Regresión bayesiana del espectro de respuesta en CU y cociente espectral de respuesta

Para estaciones localizadas en sitios de zona de lago, en donde existe solo uno o muy pocos sismos, uno puede imaginar otros dos métodos para estimar espectros de respuesta futuros basados en estaciones de referencia (típicamente en sitios de terreno firme) que han registrado muchos sismos. Estos métodos necesitan al menos de un registro simultaneo en lo sitios de referencia y de lago para calcular la amplificación empírica. Siempre será incierto, sin embargo, si esta amplificación relativa permanecerá la misma para todos los movimientos de suelo fuerte estimados o no. Pero al menos para la Ciudad de México, se sabe bien que la arcilla se comporta casi linealmente para la mayoría de los sitios y que el comportamiento no lineal observado, si algo, es pequeño y puede ser tomado en cuenta por modelos simples (Reinoso y Ordaz, 1999). El primer método para lo sitios en zona lacustre (Método 3, ver apéndice II) requiere el calculo de relaciones espectrales de respuesta; aunque estas

relaciones no tienen ningún significado físico, ellos son dirigidos para representar la amplificación en el dominio del espectro de respuesta (Rosenblueth y Arciniega, 1992; Reyes, 1999). En el apéndice II (Figura 6) se muestra el espectro de respuesta obtenido con el Método 3 (línea continua delgada) junto con el espectro de respuesta observado (línea continua oscura) y el espectro obtenido con el Método 4 (línea discontinua). De nuevo, puede verse que en general las estimaciones para SCT (ver apéndice II, Figura 6a) son aceptables. Para la estación CD los resultados para los eventos 10 y 11 son muy malos. Esto es porque el promedio del cociente espiral de respuesta no puede tener en cuenta el efecto, explícitamente, del comportamiento no lineal referido en el apéndice II. Por lo tanto las incertidumbres tienen a ser ligeramente más grandes que los Métodos 1 y 2.

2.2.4 Método 4: Regresión bayesiana del EAF en CU, función de transferencia empírica y teoría de vibraciones aleatorias

El segundo método para sitios en zona de lago (Método 4, ver apéndice II) es obtener una función de transferencia empírica usando el espectro de amplitudes de Fourier en el sitio y en la estación de referencia (Singh *et al.*, 1988; Reinoso y Ordaz, 1999) y entonces, con el espectro de amplitudes de Fourier en la estación de referencia, el uso de teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento fuerte, se determina el espectro de respuesta. Resultados de este método son presentados en el apéndice II (Figura 6) con línea discontinua. Se puede observar que muchas de las predicciones son similares a las del Método 3 pero para el evento del 19 de Septiembre de 1985 permite mejores resultados.

2.3 Predicción de espectros de respuesta en sitios no instrumentados

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación viene a discusión, sobre todo en un lugar como la Ciudad de México con una zona de lago que cambia sus características de respuesta dentro de unas docenas de metros. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de riesgo o peligro, o cualquier estudio individual de espectros de respuesta de sitio específicos. De los resultados presentados previamente está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros, es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

Sin embargo, existe un método alternativo interesante planteado por Pérez *et al.* (2007) para obtener espectros de respuesta o relaciones de atenuación de respuesta en suelo de “transición” o “blando”. Estos autores plantean un método general y sencillo basado en la conocida teoría de vibraciones aleatorias, para calcular las relaciones de atenuación de respuesta en suelo de “transición” o “blando” basados en relaciones existentes de atenuación espectral de respuesta en roca o terreno firme. El método consiste en los siguientes pasos:

- 1) Calcular, para una magnitud y distancia, el espectro de respuesta esperado de una relación de atenuación existente para terreno firme o en roca.
- 2) De este espectro de respuesta y una estimación de la duración del movimiento fuerte, calcular, el espectro de amplitudes de Fourier (EAF) esperado asociado con el correspondiente espectro de respuesta en roca para la misma magnitud y distancia.
- 3) Incluir los efectos de sitio multiplicando el EAF obtenido en el paso 2 por la función de transferencia dependiente de la frecuencia (y posiblemente de la amplitud) de los depósitos del suelo.

- 4) Finalmente, con el EAF calculado en el paso 3 y una estimación de la duración de la fase intensa del movimiento, se calcula el espectro de respuesta en el sitio de “transición “ o “blando”, el cual será visto como el valor esperado para la magnitud y distancia usada.

Para mayores detalles del método mencionado ver el trabajo de Pérez *et al.* (2007).

2.4 Discusión

Se presentaron cuatro métodos diferentes para obtener espectros de respuesta futuros dados la magnitud y la distancia al área de ruptura basados en datos acelerométricos. Estos métodos se han usado en muchas aplicaciones incluso en el cálculo de los espectros de diseño incluido en el código y en muchos estudios que consideran riesgo sísmico en varios sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender y calcular sus errores y las incertidumbres es muy importante para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, la regresión de Bayesiana directa de espectros de respuesta, es la mejor opción puesto que mostró los más pequeños errores y desviaciones. El problema con el Método 1 es que necesita un conjunto amplio de registros (espectros de respuesta) para ser confiable, y éste no es el caso para la mayoría de los sitios. Realmente, es sólo cierto para los sitios presentados en este trabajo (CU, SCT y CD); para cualquier otro sitio el Método 1 no puede aplicarse.

El Método 2 es basado en los espectros de amplitudes de Fourier y el uso de la teoría de vibración aleatoria junto con la duración del movimiento fuerte, un paso que introduce aproximaciones que pueden reducir su confiabilidad. Las desviaciones estándar calculadas para este método son normalmente las más grandes.

Para la zona de lago, la falta de datos para la mayoría de los lugares hace que los Métodos 1 y 2 sean casi inútiles. Esto es por lo que los Métodos 3 y 4, que dependen de los datos observados en la estación de referencia (CU), son empleados. El Método 3 que está basado en los espectros de respuesta en CU y el uso de cocientes espectrales de respuesta es mejor que el Método 4 donde el uso de la teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento de suelo fuerte introducen incertidumbres y errores. Por supuesto, esto es considerando que el comportamiento no lineal no ocurre en el suelo de la Ciudad de México que todavía será confirmado por registros futuros.

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación es discutible, especialmente en un lugar como la Ciudad de México. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de peligro o riesgo, o cualquier estudio individual del espectro de respuesta del sitio específico. De los resultados presentados en este trabajo está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

Sin embargo, se presenta un método alternativo para la obtención de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia (implícito leyes de atenuación) en sitios no instrumentados. Para ello, es necesario contar, solamente, con una ley de atenuación del espectro de respuesta en roca (sitio de referencia) y conocer las propiedades geotécnicas del sitio. Por lo que resultará atractivo, en la práctica, para muchos sitios en donde no se cuenta con registros y se desea realizar PSHA.

Capítulo 3

Funciones de Green empíricas modificadas por atenuación para sitios distantes de la fuente sísmica

En este capítulo se presenta un esquema para modificar la función de Green empírica por atenuación considerando: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Los acelerogramas calculados con el método de simulación propuesto son comparados, en el dominio del tiempo y frecuencia, con movimientos sísmicos de tipo subducción y profundidad intermedia registrados en México. Se muestra como la técnica de función de Green empírica junta con una expresión propuesta puede simular la forma y amplitud del espectro de respuesta y de amplitudes de Fourier a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica. Este trabajo ha sido publicado y se incluye en el apéndice III.

3.1 Importancia de la técnica de simulación de funciones de Green empíricas

Muchos problemas de diseño sísmico, tales como el diseño de estructuras importantes, requiere el uso de acelerogramas. Una posible manera de obtener movimientos de suelo debido a los eventos sísmicos grandes futuros esperados es el uso de la técnica de las funciones de Green empírica. La idea básica es usar registros de eventos de magnitud pequeña como aproximaciones de las funciones Green, y convolucionar estos adecuadamente usando leyes de escalamiento sísmico, para simular movimientos sísmicos que correspondan a los eventos de magnitud grande (Hartzell, 1978). De esta manera, es posible tener en cuenta condiciones locales en el sitio registrado, así como los efectos de propagación entre la fuente y el receptor. Se han propuesto esquemas diferentes de esta técnica para simular el proceso de ruptura de un sismo (Irikura, 1983; Joyner y Boore, 1986; Boatwright, 1988; Wennerberg, 1990; Kanamori *et al.*, 1993; Zeng *et al.*, 1994; Tumarking *et al.*, 1994; Hutchings, 1994a; Ordaz *et al.*, 1995). La técnica de las funciones Green no tiene en cuenta efectos de sitio no lineales, pero es posible incorporarlos con análisis no lineales geotécnicos (Heuze *et al.*, 1997; Nozu y Morikawa, 2004). La técnica también ha sido validada para calcular historias de movimientos de suelo de sismos importantes como son San Fernando (Hutchings, 1994b), Loma Prieta (Hutchings, 1991; Jarpe y Kasameyer, 1996) y Northridge (Hartzell *et al.*, 1999, 2005), y para la predicción de eventos futuros (Hutchings *et al.*, 1996).

Sin embargo, el método basado en funciones de Green empíricas presenta una limitación importante: no es aplicable a casos con distancias diferente de la fuente al sitio de aquéllos para los que la función de Green está disponible. Ésta es una limitación fuerte para la mayoría de los propósitos prácticos, ya que a menudo, un sismo registrado en el sitio, para la distancia deseada y de la magnitud apropiada, no esta disponible. Éste es el caso, por ejemplo, cuando se requiere que las historias de tiempo de aceleración a ser usadas en un diseño sísmico sean consistentes con un escenario sísmico definido, por ejemplo, en términos del máximo sismo creíble localizado a una distancia dada. En trabajos anteriores (*p.e.* Kamae *et al.* 1998) se propone una técnica híbrida para simular movimientos sísmicos de fuente cercana, los cuáles combinan métodos determinísticos y estocásticos para generar funciones de Green simuladas, en regiones en donde la ausencia de eventos de magnitud pequeña impiden aplicar la técnica de funciones de Green. Sin embargo, es tambien de gran interés obtener acelerogramas en sitios localizados a varios cientos de kilometros de la fuente sísmica. Para sitios cercanos a la fuentes son

necesarios más parámetros para representar la fuente (Bour y Cara, 1997) y para sitios lejanos de la fuente tales efectos podrían considerarse insignificantes o nulos para propósitos prácticos. Por lo tanto, se muestra que es posible utilizar una función de Green empírica con cierta magnitud y distancia, para simular un evento de mayor magnitud y distancia diferente a la registrada, pero localizada en la misma región. Mayores detalles se presentan en el apéndice III.

3.2 Descripción del método de funciones de Green empíricas modificadas por atenuación

Un sismo de magnitud pequeña registrada en el sitio de interés será visto como una función de Green empírica. Este registro debe presentar características similares a las de un gran sismo y ser representativo de la fuente sísmica y del mecanismo de falla de interés (*p.e.* mecanismo de falla inversa o de falla normal). Tal función de Green es modificada por efectos de atenuación mediante la ec. 3 (Apéndice III) a la distancia del evento objetivo usando parámetros sismológicos; con esta nueva historia de tiempo y la técnica de funciones de Green (para el trabajo se usa el método de Ordaz *et al.* 1995), se obtienen movimientos de suelo correspondientes al evento objetivo. Una descripción más detallada acerca de la ec. 3 mencionada para modificar la función de Green por efectos de atenuación puede ser vista en el apéndice III.

3.3 Ejemplos

A continuación se presentan tres ejemplos para probar el esquema descrito anteriormente. En el apéndice III (Tabla 1) se señalan los parámetros de los sismos usados en este capítulo. En el apéndice III (Tabla 2) se muestran las estaciones usadas y los datos disponibles de movimientos sísmicos fuertes. Como es mostrado en el apéndice III (Tabla 2), las estaciones seleccionadas cubren un amplio rango de distancia al área de ruptura ($28 < R < 320$ km), incluyen estaciones fuera y dentro de la Ciudad de México. La localización de estaciones, epicentros y área de ruptura de eventos indicados el apéndice 3 (Tabla 2) se señalan en la Figura 3 de este apéndice.

3.3.1 Sismo del 19 de Septiembre de 1985

Se usan registros de movimientos de suelo fuerte (componente EW) producidos por el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$) como evento objetivo y los registros del sismo del 21 de septiembre de 1985 ($M=7.6$) como función de Green empírica. Tales funciones de Green son modificadas por atenuación a la distancia del evento objetivo (ver ec. 3 y Tabla 2 del apéndice III) usando parámetros mostrados en la Tabla 1 del apéndice 3; con estas nuevas historias de tiempo y la técnica de funciones de Green (Ordaz *et al.* 1995), se obtienen movimientos de suelo fuerte correspondientes al evento objetivo. El momento sísmico para el evento objetivo es $M_{0S}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_S=150$ bar (ver Tabla 1 del Apéndice III). El momento sísmico reportado para la función de Green empírica es $M_{0R}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_R=75$ bar (Tabla 1 del apéndice III). La Figura 3.1 muestra datos y simulaciones, incluyendo historias de tiempo de aceleración, así como también los espectros de Fourier y de respuesta observados y calculados. Los resultados corresponden a todas las estaciones acelerométricas disponibles que registraron tanto el evento objetivo como el evento usado como función de Green. Se puede observar que las historias de tiempo simuladas tienen una razonable aproximación con los registros observados para distancias intermedias y lejanas; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente sísmica, efectos de directividad son muy importantes por lo que los resultados no son aceptables (*p.e.* Estación AZIH Fig. 3.1a). Esto podría ser debido a que los efectos de directividad causan variaciones espaciales en el movimiento del suelo alrededor de la falla (Somerville *et al.* 1997) los cuales son difíciles de predecir. La Figura 3.1 también compara los espectros de respuesta observados (líneas continuas) para el evento del 19 de

Septiembre con el correspondiente espectro de respuesta esperado (líneas discontinuas) para las simulaciones. El último ha sido calculado promediando el espectro de varias simulaciones. Aunque estos espectros difieren para cada simulación, el espectro esperado es solamente consecuencia del escalamiento ω^2 y atenuación asumida. Nuevamente, se puede ser observado en al Figura 3.1 que los espectros de respuesta estimados para el evento objetivo son buenos, excepto para la estación AZIH, donde las ordenadas espectrales son sobreestimadas.

3.3.2 Sismo del 14 de Septiembre de 1995

Se usan movimientos del suelo registrado del sismo del 24 de Octubre de 1993 ($M=6.7$, $M_{OR}=1.20 \times 10^{26}$ dina-cm y $\Delta\sigma_R=10$ bar; ver Tabla 1 del apéndice III) como funciones de Green empíricas y los registros del sismo del 14 de septiembre de 1995 como evento objetivo. Este sismo fue registrado en varias estaciones (Tabla 2 y Fig. 3 del apéndice III). El momento sísmico del evento objetivo es $M_{OS}=1.11 \times 10^{27}$ dina-cm. La caída de esfuerzo $\Delta\sigma_S=16$ bar fue encontrada trazando la relación espectral promedio del evento objetivo entre el evento usado como función de Green empírica para todas las estaciones, fijándolo a la relación espectral predicha por un modelo ω^2 (Ordaz *et al.* 1995). La Figura 3.2 muestra la comparación para todas las estaciones de los datos observados y calculados, incluyendo historias de tiempo de aceleración y los espectros de Fourier y de respuesta. Se observa que aparte de la estación cercana a la fuente sísmica, COPL (Figura 3.2a), las historias de tiempo simuladas, espectros de Fourier y de respuesta son bastante bien aproximadas con los registros observados.

3.3.3 Sismo del 23 de Mayo de 1994

Existen evidencias que las características de fuentes y propagación de la onda de eventos de profundidad intermedia son diferentes a la de los eventos de subducción (*p.e.* Furumura y Singh, 2002; García *et al.* 2004). Por lo tanto es importante probar que el método propuesto es aplicable a ambos tipos de eventos. Se considera como evento objetivo al sismo del 23 de Mayo de 1994 con M 6.2 ($M_{OS}=2.77 \times 10^{25}$ dina-cm y $\Delta\sigma_S=324$ bars, ver Tabla 1 del apéndice III), el evento se selecciono debido a que fue registrado en muchas estaciones (ver Tabla 2 y Fig. 3 del apéndice III). Se usan registros de movimientos de suelo del sismo del 20 Abril de 1998 con M 5.9 ($M_{OS}=1.01 \times 10^{25}$ dina-cm y $\Delta\sigma_R=206$ bars, ver Tabla 1 del apéndice III) como funciones de Green empíricas. La Figura 3.3 muestra historias de tiempo de aceleración, así como también los espectros de Fourier y de respuesta observados y simulados. Los resultados corresponden a todas las estaciones usadas en las cuales se registraron ambos eventos. Pocas diferencias en las trazas observadas y simuladas pueden ser notadas. Es claro que el método es confiable y que el evento del 20 de Abril trabaja como una excelente función de Green para el evento del 23 de Mayo de 1994.

3.4 Discusión

Se presentó una expresión para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación considerando: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Las intensidades calculadas con el método de simulación son comparadas con sismos de subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). El método muestra una buena aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente el método pierde precisión debido a patrones de radiación y heterogeneidad de la fuente, para estos casos, otras alternativas deben ser usadas.

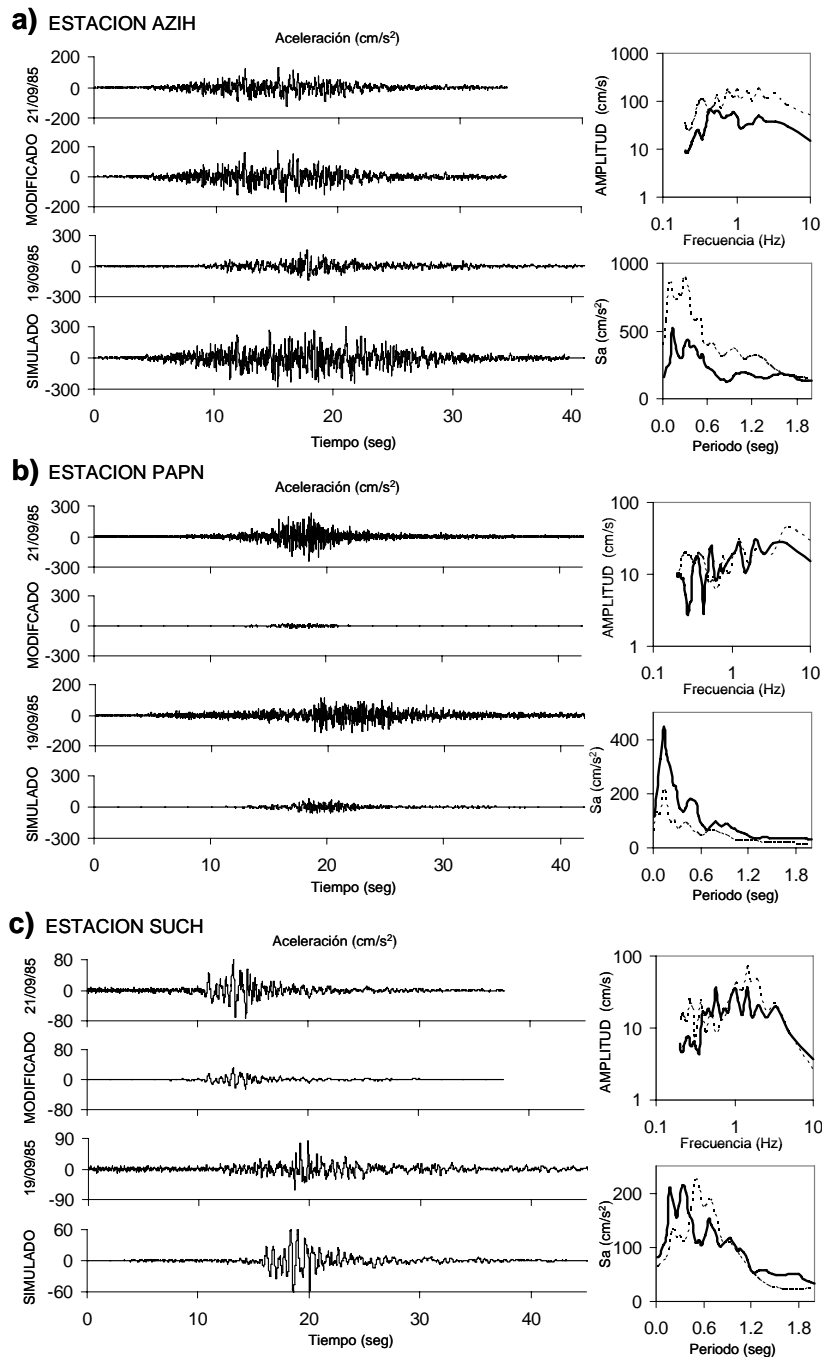


Figura 3.1. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

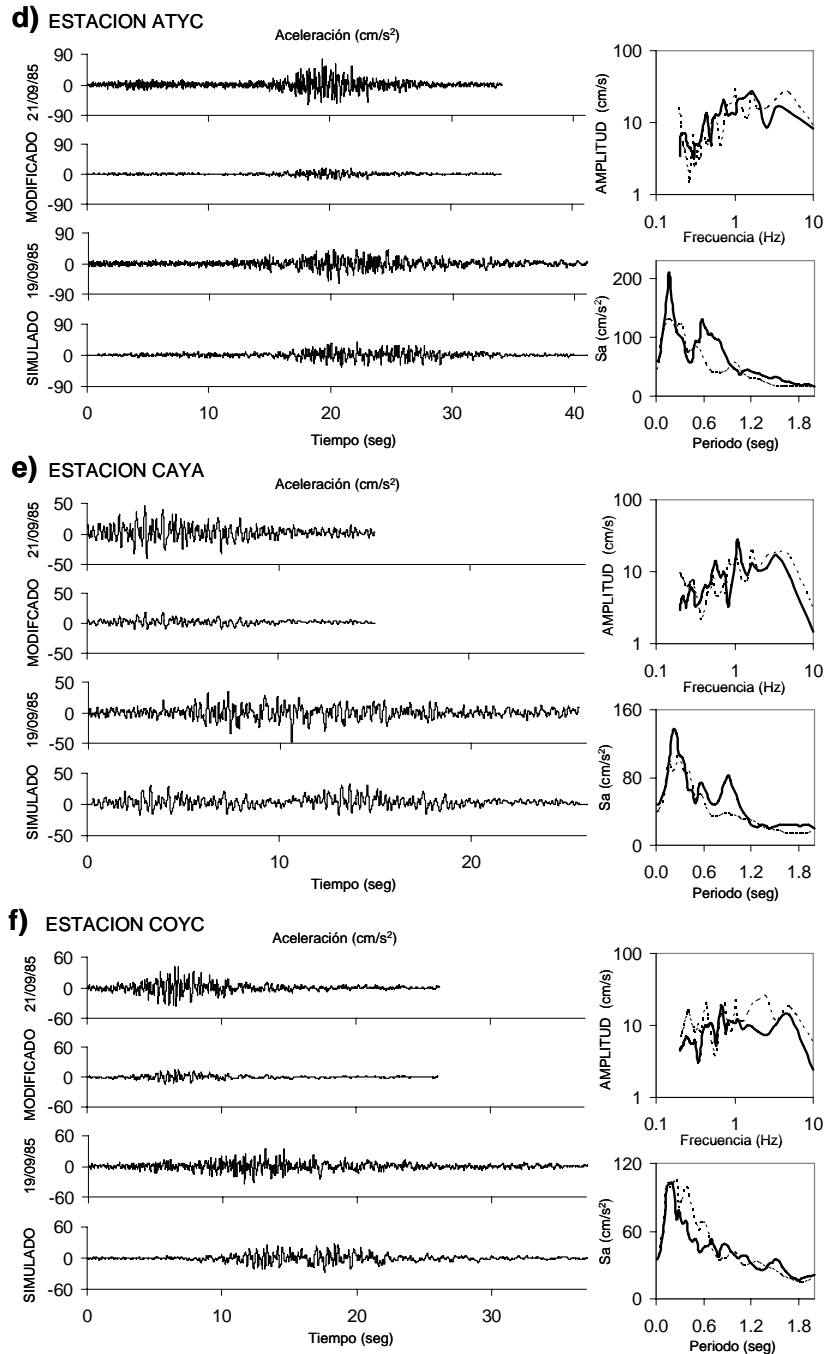


Figura 3.1 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) ATYC, (e) CAYA y (f) COYC, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

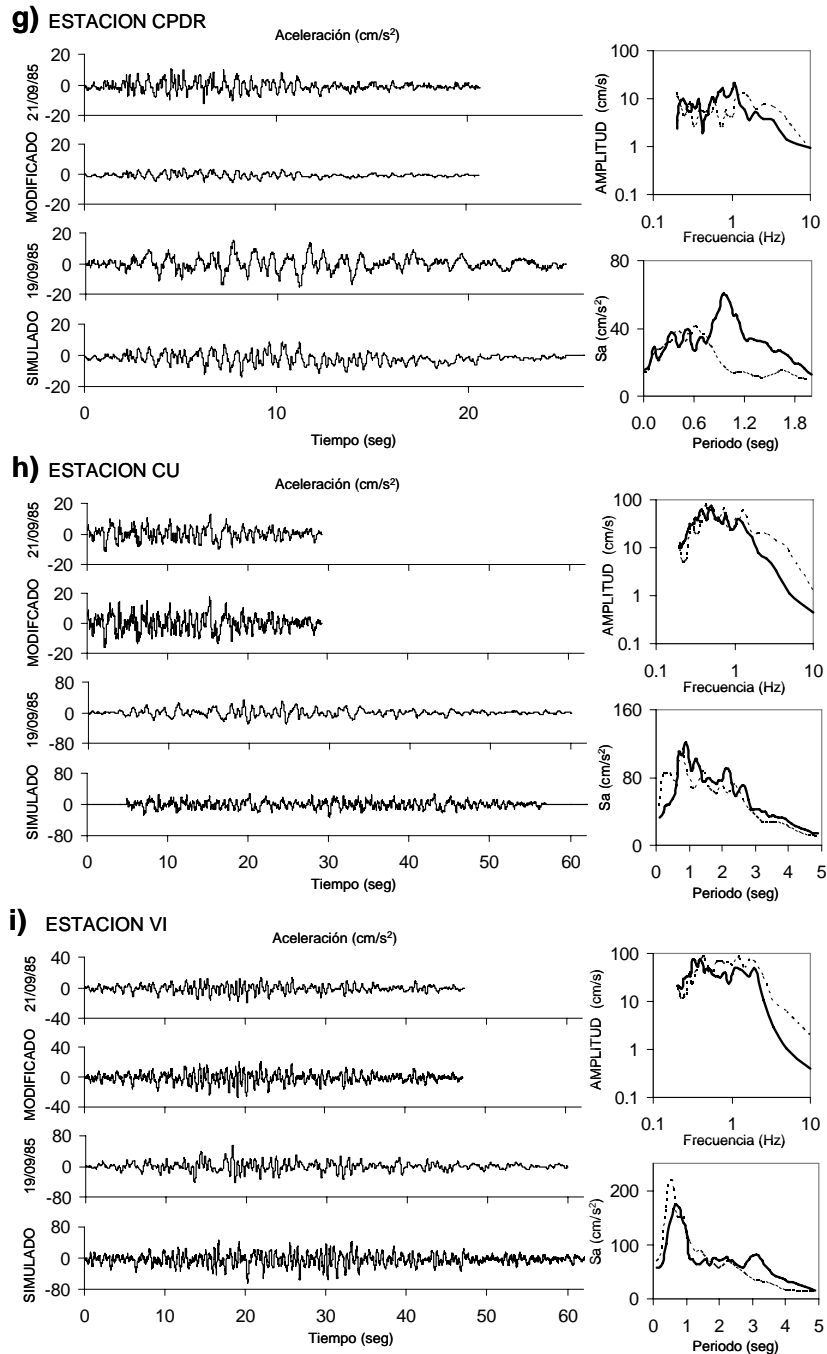


Figura 3.1 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (a) CPDR, (b) CU y (c) VI, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

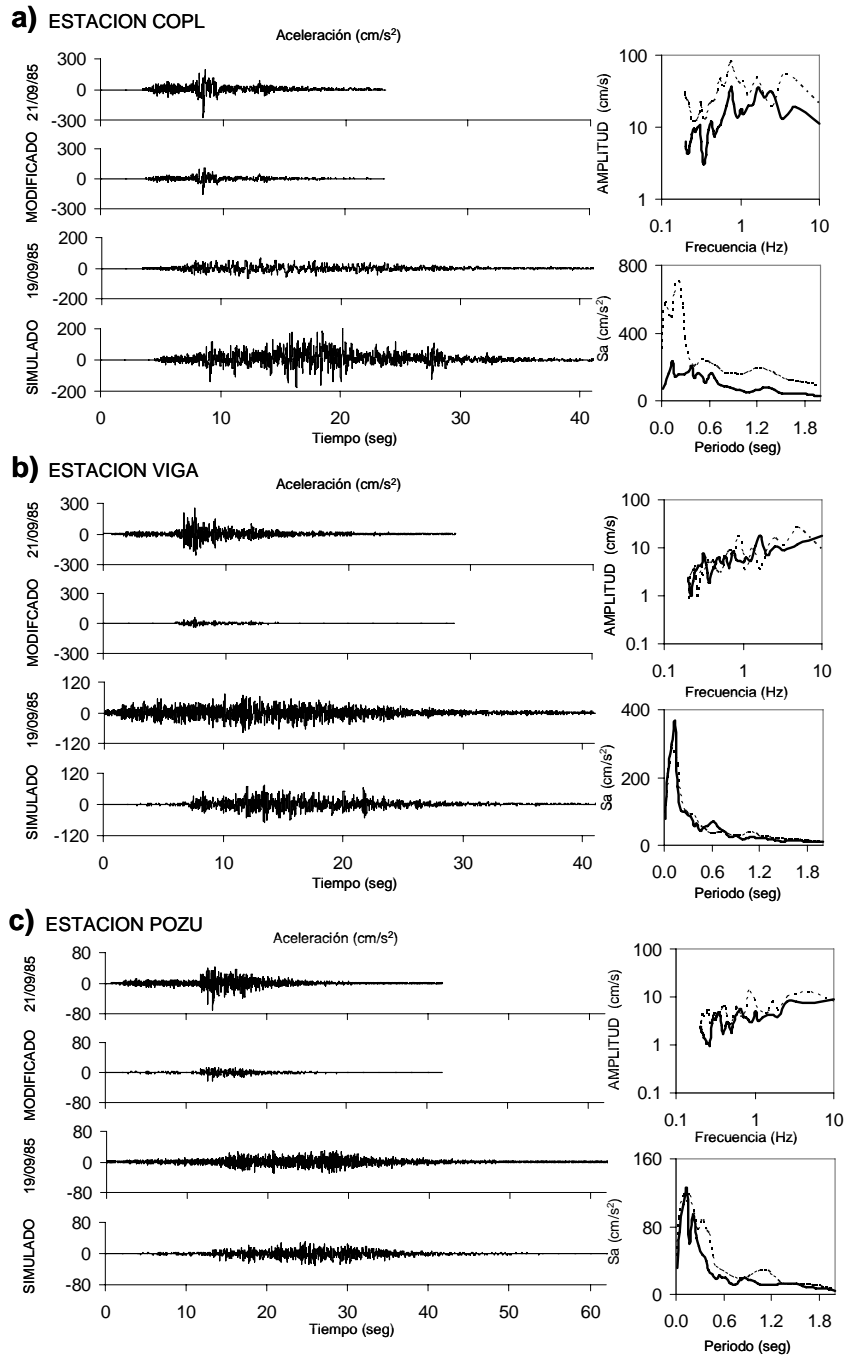


Figura 3.2. Historias de aceleración para estaciones (a) COPL, (b) VIGA y (c) POZU, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

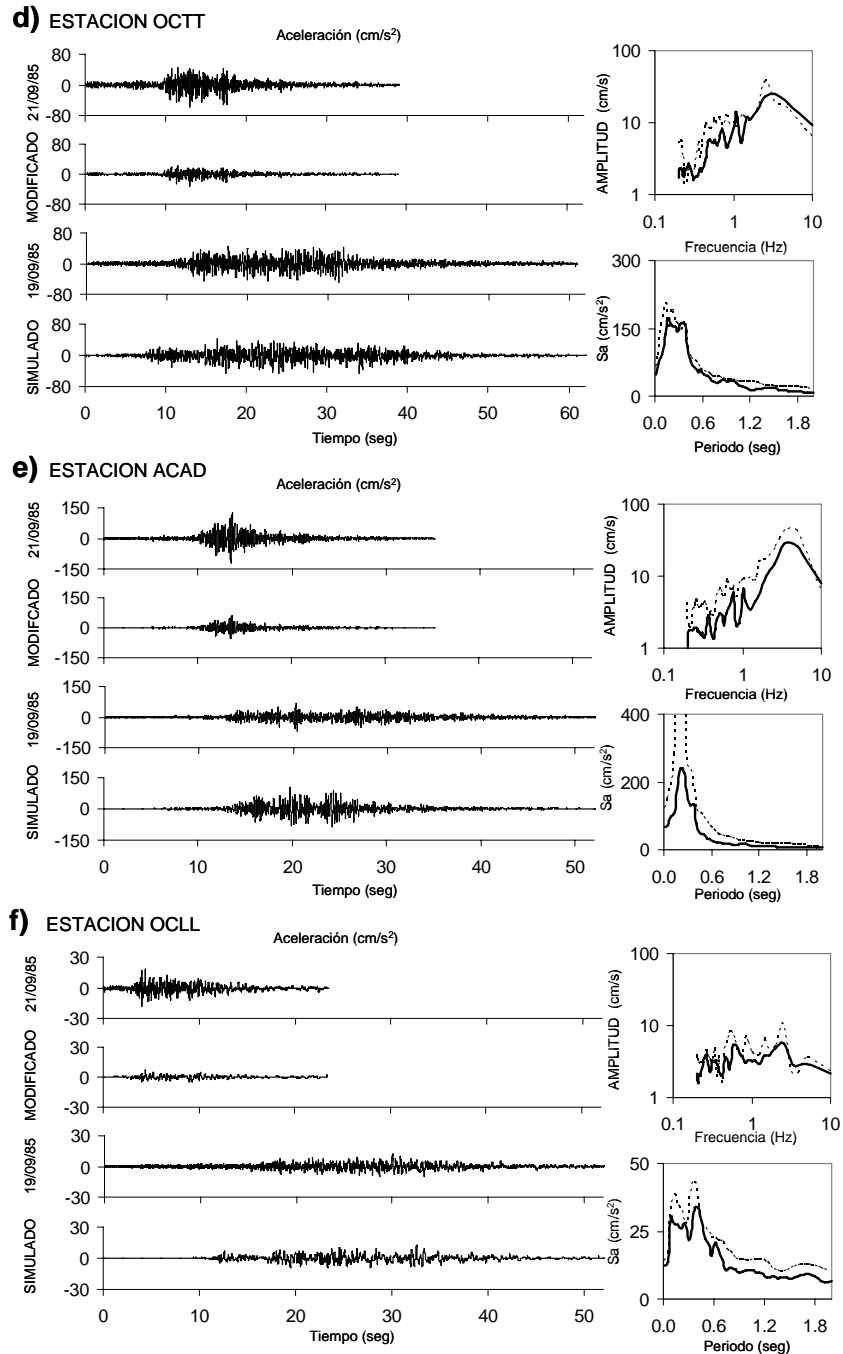


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) OCTT, (e) ACAD y (f) OCLL, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

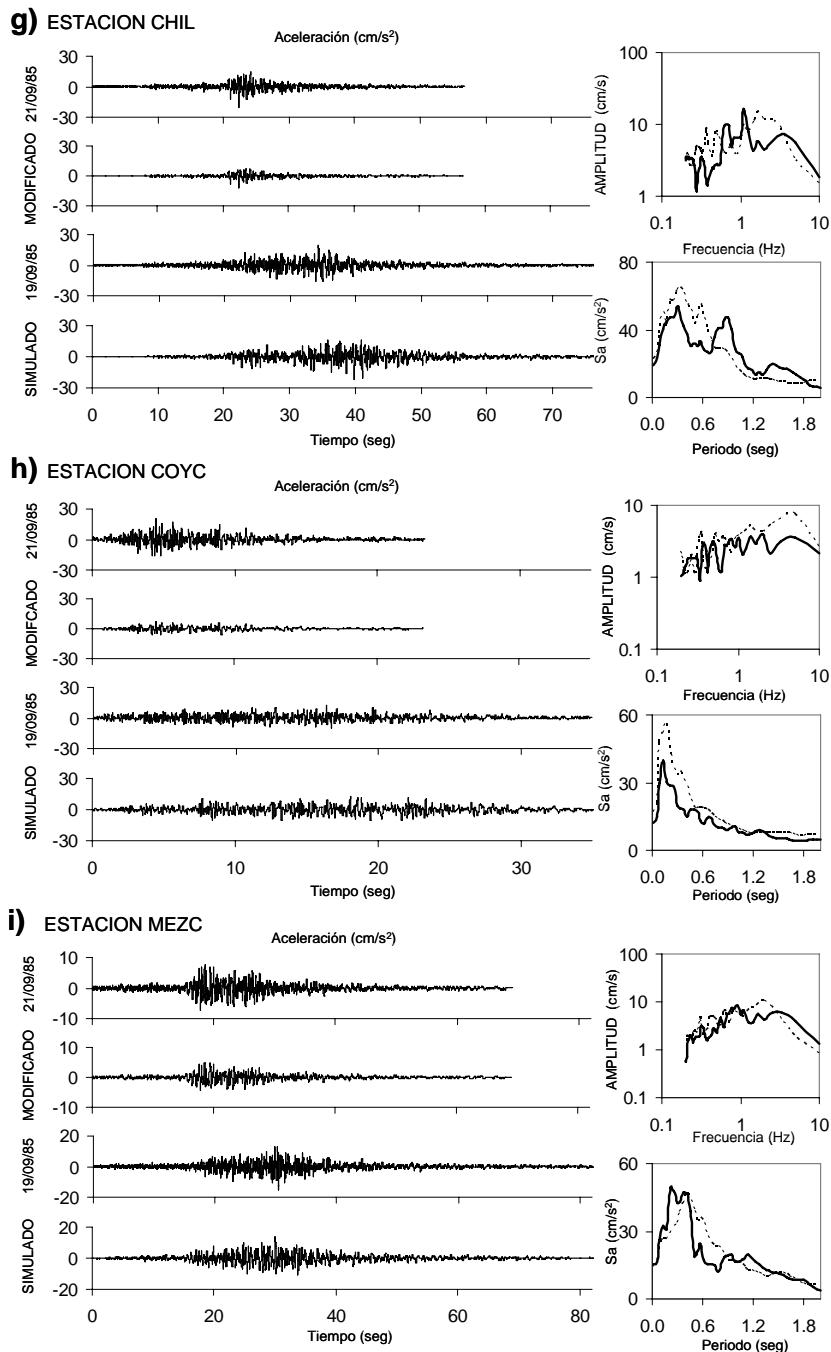


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) CHIL, (h) COYC y (i) MEZC, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

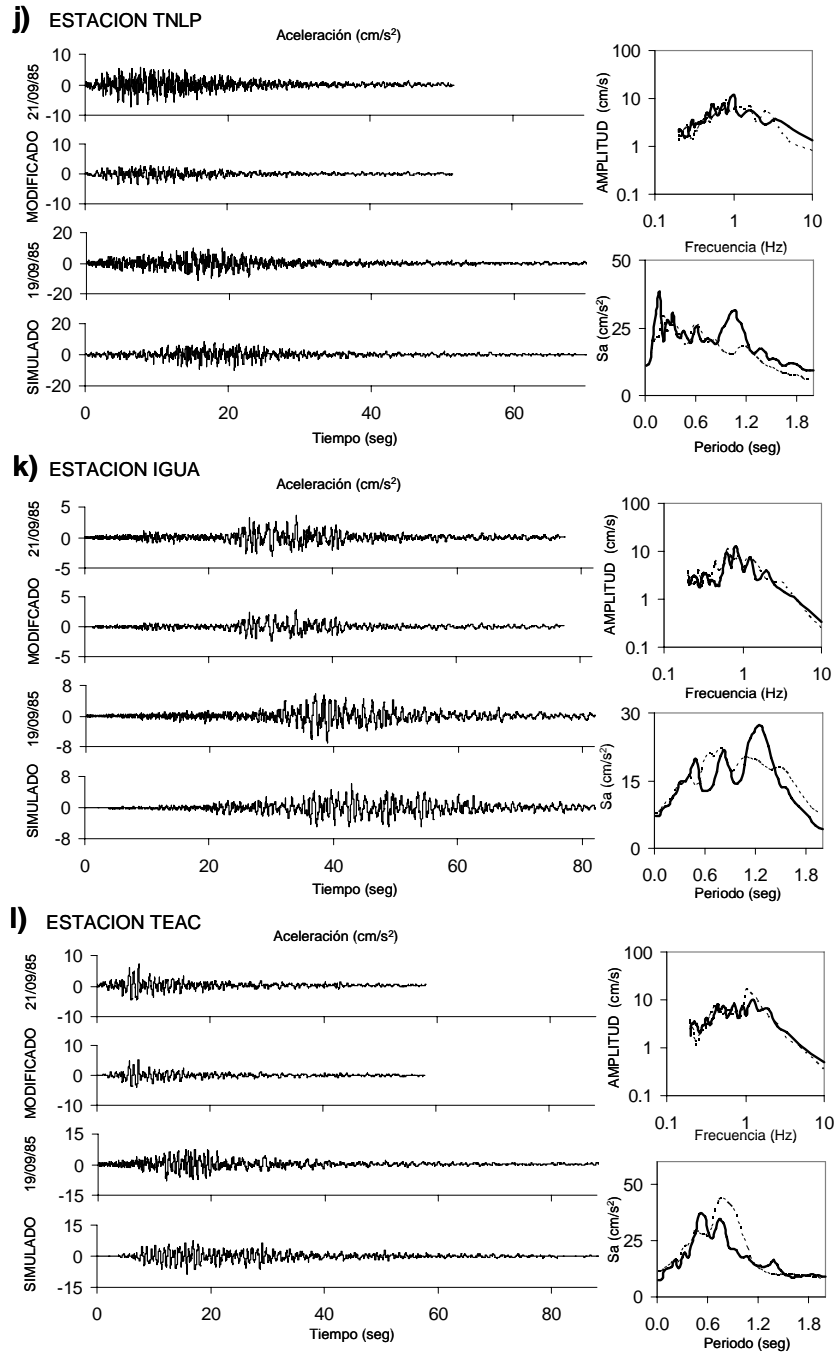


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) TNLP, (k) IGUA y (l) TEAC, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

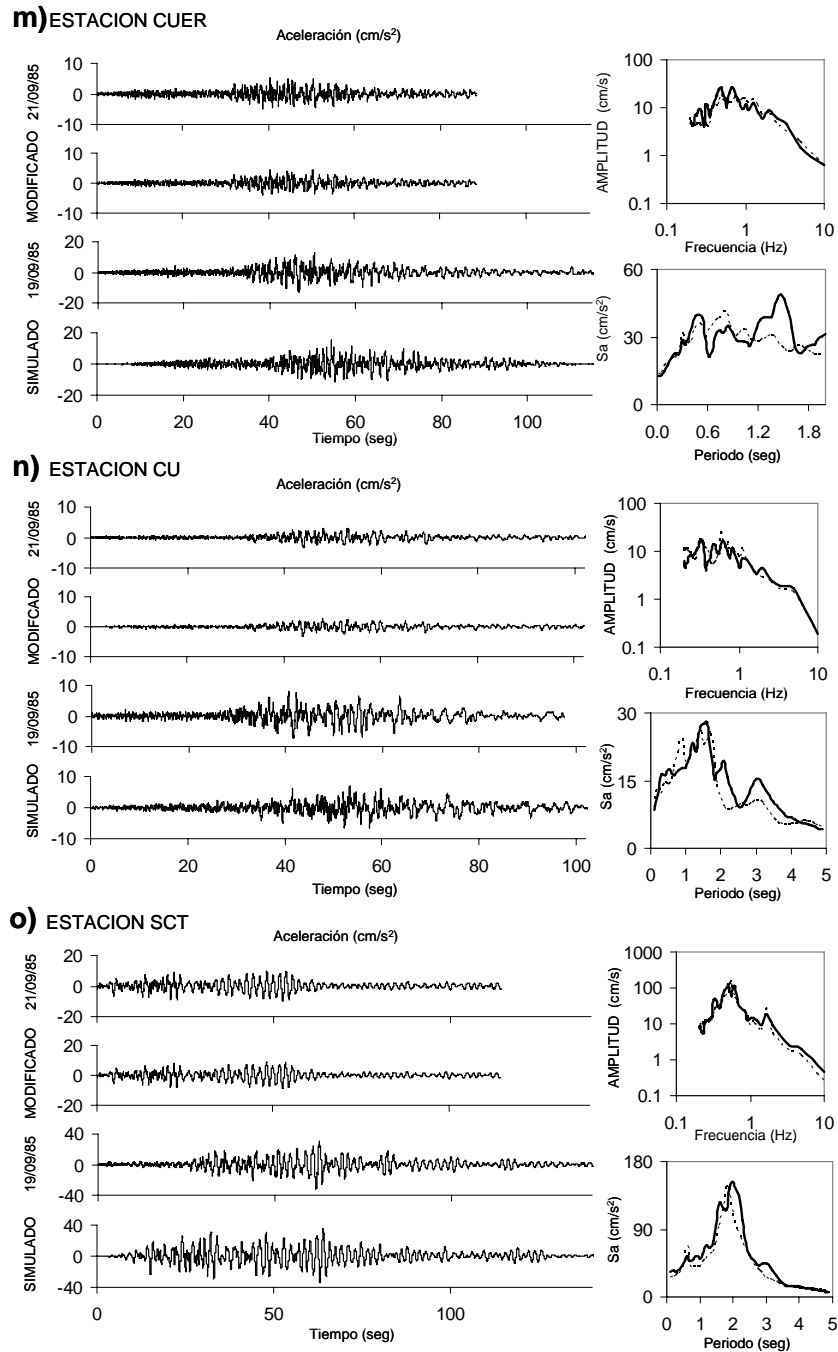


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (m) CUER, (n) CU y (o) SCT, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

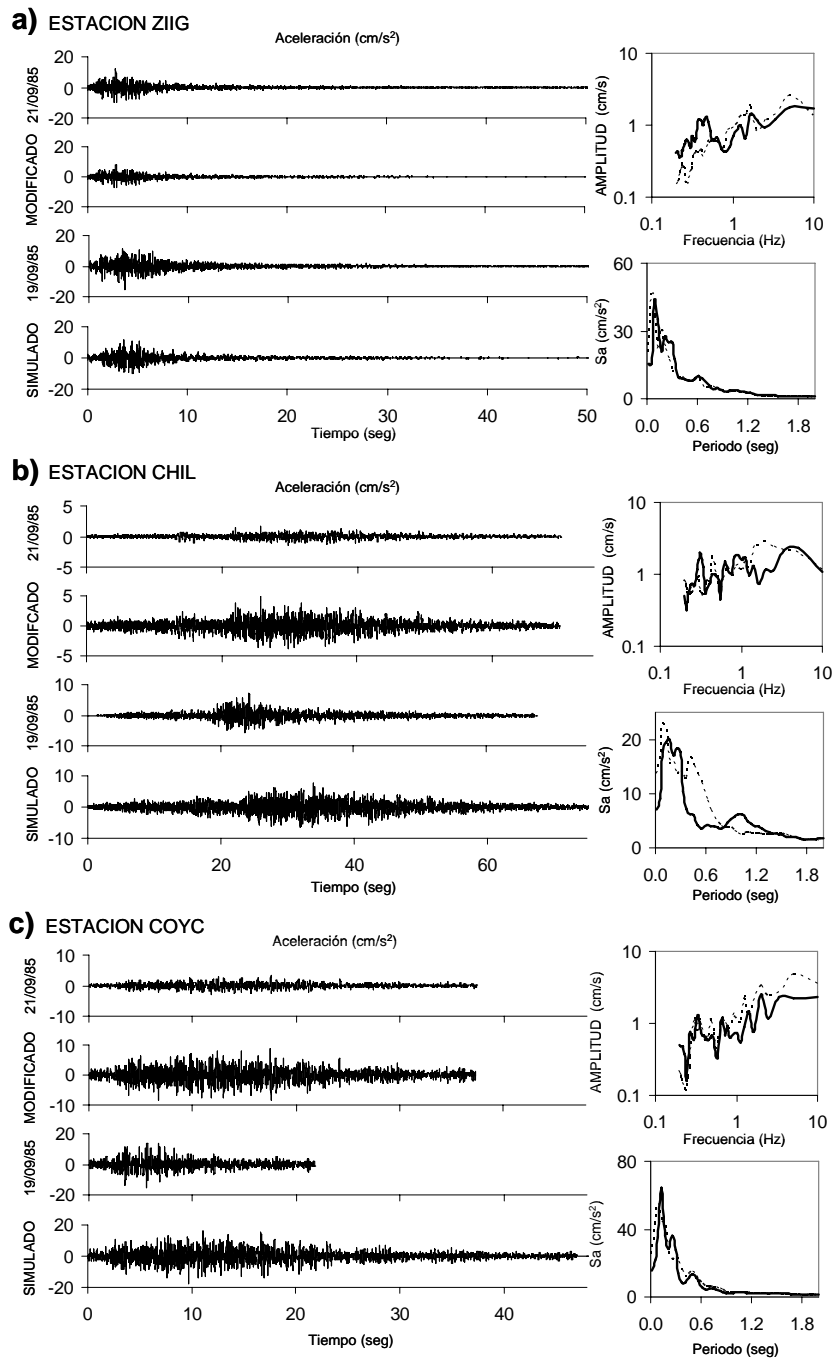


Figura 3.3. Historias de aceleración para estaciones (a) ZIIG, (b) CHIL y (c) COYC, (ver figura 2) del evento del 20 de Abril usado como función de Green (superior), el evento del 20 de Abril de 1998 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 23 de Mayo de 1994 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

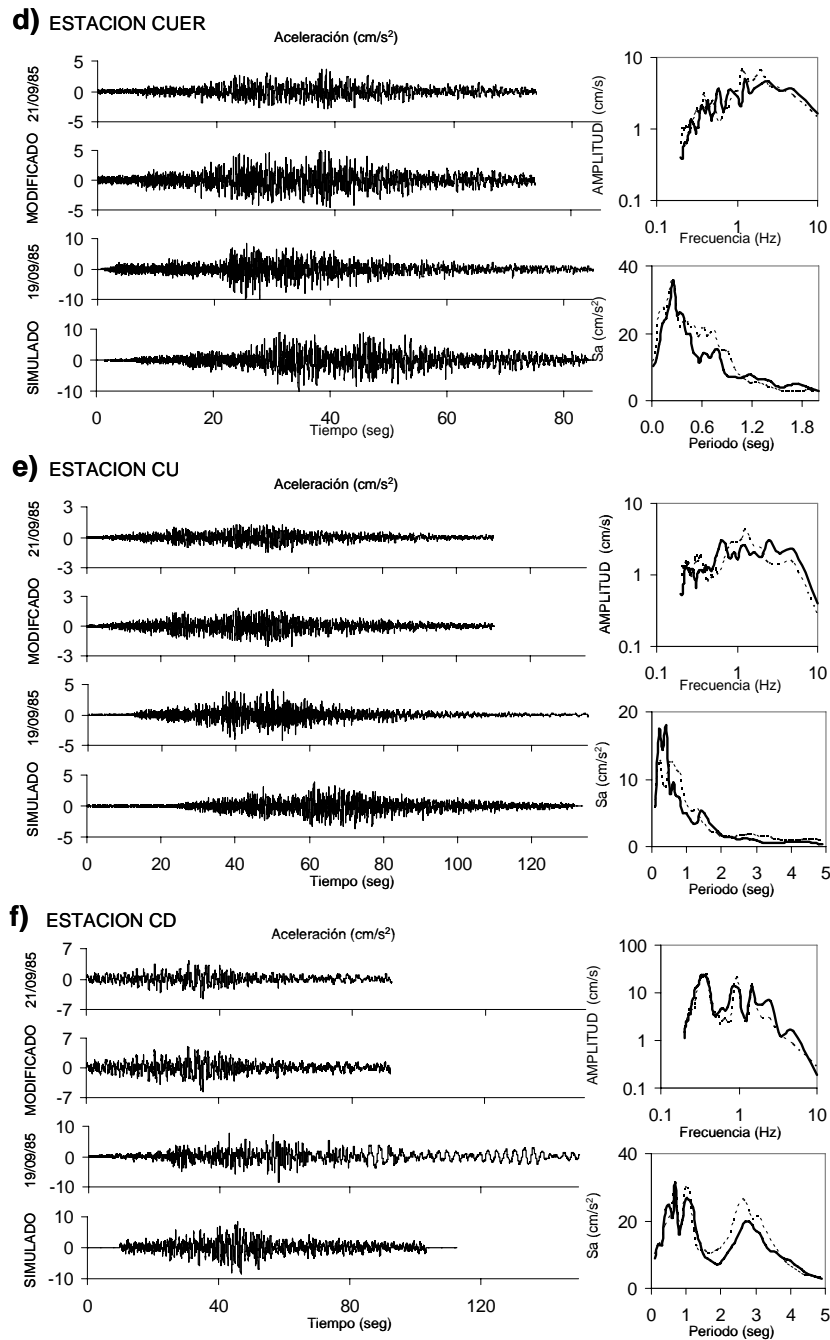


Figura 3.3 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) CUER, (e) CU y (f) CD, (ver figura 2) del evento del 20 de Abril usado como función de Green (superior), el evento del 20 de Abril de 1998 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 23 de Mayo de 1994 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

Capítulo 4

Métodos para generar acelerogramas con propósitos de diseño estructural

En este capítulo se comparan cinco métodos para predecir historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Los métodos son: (1) escalando acelerogramas existentes hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido, (2) simulando movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño o un espectro de respuesta, (3) usando funciones de atenuación generalizadas, (4) aplicando un método estocástico y (5) usando la técnica de funciones de Green empíricas. Se usan registros de datos mexicanos para comparar en forma cualitativa entre los observados y los obtenidos con los métodos.

4.1 Métodos existentes

El uso de historias de tiempo de aceleración es esencial para el diseño de estructuras complejas, así como para el análisis y mitigación del riesgo sísmico. Por lo tanto, obtener historias de aceleración futuras es un tema de esencial interés para el diseño presente de estructuras eficientes y seguras. Existen muchos esfuerzos para estimar historias de tiempo en un sitio dado usando movimientos de suelo observados, así como en sitios no instrumentados. El más obvio es el uso de registros disponibles en bancos de base de datos mundiales (Bommer *et al.* 1998, 2000) con características similares; ingenieros usan este método pero muchas veces no son conscientes de las diferencias que existen entre las fuentes sísmicas, atenuación y efectos de sitio. Otra opción práctica (Método 1) es escalar acelerogramas existentes en un sitio hasta alcanzar un nivel de intensidad. Debido a su simplicidad, esta opción es también muy popular entre los ingenieros; sin embargo, escalar, sin basarse en un modelo físico, solo considera la amplitud ya que es difícil tomar en cuenta la magnitud y distancia con el cambio respectivo en el contenido de frecuencia y duración del movimiento (¿porqué se debe escalar con la aceleración máxima del suelo y no con la velocidad máxima del suelo o con el espectro de respuesta en un periodo dado?. Otro método popular (Método 2) es usar movimientos sísmicos simulados compatibles con un espectro de diseño del sitio prescripto y bien conocido; sin embargo, estas historias de tiempo no tienen la apariencia de movimientos sísmicos reales, y cuando la estructura se somete a ellos, se sobrestiman las demandas de desplazamientos y la energía de entrada (Naeim y Lew, 1995). Otra alternativa (Método 3) es 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.* 2001a) pero es necesario tener un número considerable de acelerogramas registrados en el sitio para encontrar parámetros estadísticos como una función de la magnitud y distancia. Otra opción (Método 4) es simular movimientos sísmicos basados en un modelo físico que considera la fuente, propagación de la onda y efectos de sitio (Papageorgiou y Aki, 1983; Boore 1983, 2003); y un modelo alternativo (Método 5) más conveniente para generar movimientos de fallas distantes es el propuesto por Hartzell (1978) que usa sismos registrados pequeños como funciones de Green empíricas para simular grandes sismos; 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 esfuerzo, el momento sísmico, la atenuación, entre otros. Finalmente, en los últimos años, se han llevado a cabo análisis probabilísticos de la demanda sísmica para algunas estructuras (Shome y Cornell, 1998, 1999; Chan *et al.* 2005) con el propósito de encontrar, en una cierta estructura, el número de registros para ser usados,

escalando registros para estimar la demanda sísmica (Método 1). Esto incluye 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. Sin embargo, hay todavía muchos obstáculos para adoptar estos métodos en la práctica de la ingeniería común y simple. Estos métodos necesitan un número considerable de acelerogramas en el sitio para determinar el número de registros útiles para diseñar la estructura para dar una cierta distorsión de diseño. La Figura 4.1 muestra un diagrama, esquemático, que describe cada uno de estos métodos.

Los ingenieros pueden usar cualquiera de los métodos arriba descritos para obtener movimientos sísmicos y estudiar sus estructuras, pero ellos deben tener en mente que cada método tiene ventajas y desventajas que deben ser consideradas. En lo que sigue, se presenta la aplicación de cinco métodos para predecir historias de tiempo de aceleración futuros con propósitos de diseño. Todos los métodos son aplicados en estaciones cercanas a la costa de México. Se mencionan algunos problemas que podrían presentarse en su aplicabilidad en la práctica.

Se usan los registros de movimientos de suelo (componente EW) producidos por el sismo del 19 de Septiembre de 1985 ($M=8.1$) como el evento objetivo. Se presentan únicamente resultados de estaciones fuera de la Ciudad de México que registraron tal evento. La Figura 4.2 muestra la superficie de ruptura, la localización de los epicentros y estaciones usadas en este estudio. A continuación, se comparan de forma cualitativa las historias de tiempo de aceleración, espectros de amplitudes de Fourier y de respuesta con aquellos calculados con los cinco métodos mencionados.

4.2 Método 1: Escalar acelerogramas de un sitio hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido

En este método la amplitud de cada uno de los movimientos sísmicos registrados en el sitio estudiado es modificada por un factor de escala. Este factor es un valor numérico que multiplica la historia de aceleración del registro hasta alcanzar un nivel de intensidad (*p.e.* la aceleración máxima del suelo, ordenada sísmica, entre otros). Para este estudio, se consideró como medida de intensidad la aceleración máxima del suelo (PGA, *Peak Ground Acceleration*). Los eventos se escalaran para alcanzar el nivel de intensidad registrado en cada estación debido al evento del 19 de septiembre 1985. Recordemos que deseamos comparar los movimientos obtenidos del Método 1 con el evento objetivo (19 septiembre 1985). Para hacer uso de este método, se utilizaron los registros de los registros de los eventos del 21 de septiembre de 1985 y 25 de abril de 1989. Ellos son escalados para obtener la aceleración máxima del suelo del evento objetivo. Tabla 4.1 da los valores de aceleración máxima del suelo del evento objetivo y los factores de escala, F_{esc} , usados en cada estación. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran datos y escalamiento usando el evento del 25 de abril de 1989 y el 21 de septiembre de 1985 como evento a escalar, respectivamente. Se incluyen historias de aceleración, así como espectro de amplitudes de Fourier y de respuesta observados y escalados. Se comparan los espectros de respuesta observados de cada estación para el evento del 19 de septiembre con el correspondiente espectro escalado. Se puede observar que en estaciones relativamente cercanas a la fuente (*p.e.* PARS, ATYC y CAYA), al usar el evento del 25 de abril como evento a escalar, se tiene una buena aproximación de las intensidades espectrales; pero no ocurre así para estaciones lejanas de la fuente (*p.e.* CPDR). Sin embargo, si observamos las historias de aceleración, se observa que hay una mala aproximación con la del evento objetivo. Al usar el evento del 21 de septiembre como el evento escalado, se obtienen buenas aproximaciones, tanto en estaciones cercanas como lejanas, al calcular el espectro de amplitudes de Fourier y el de respuesta; sin embargo, nuevamente las historias de tiempo no concuerdan con las observadas durante el evento objetivo.

4.3 Método 2: Simular movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño

Se generan historias de tiempo compatibles con el espectro de diseño (HTCED) usando el programa SATGEN (Pérez *et al.* 2006). El método usa un procedimiento iterativo que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a las amplitudes correspondientes al espectro de diseño o de respuesta de aceleración objetivo. El espectro de diseño es obtenido del manual de la Comisión Federal de Electricidad considerando la ubicación de cada sitio. La Figura 4.5 muestra las historias de aceleración del evento objetivo (19 de septiembre de 1985), así como las historias de aceleración acopladas al espectro de diseño que debe aplicarse para cada sitio. Debido a que el espectro de diseño gobierna para todas las estaciones, las historias de aceleración son comparadas solamente en algunas estaciones, así como el espectro de respuesta observado y calculado. En la figura se puede observar que la respuesta de la historia de aceleración calculada con el Método 2 (línea gris) se acopla en forma aceptable al espectro de diseño (línea oscura). Sin embargo, las historias de aceleración obtenidas con el Método 2 no son semejantes a las del evento objetivo; incluso no tienen una apariencia real. Esto es debido a que el proceso para pasar de un espectro de aceleraciones al espectro de amplitudes de Fourier proviene de un proceso que se considera estacionario.

Por otro lado, se calcula los movimientos sísmicos compatibles con el espectro de respuesta producido por el sismo del 19 de septiembre de 1985 (ver Figura 4.6). Nuevamente, se puede observar que las historias de tiempo no tienen una apariencia real, debido a lo señalado anteriormente, aun cuando las historias se hacen compatibles al espectro de respuesta requerido.

4.4 Método 3: Desarrollar funciones de atenuación generalizadas

Se usan parámetros y funciones de atenuación generalizadas (Alamilla *et al.* 2001a) para calcular historias de aceleración en terreno firme correspondientes a sismos generados en la costa de México. Este Método 3, considera las historias de aceleración como una realización de un proceso estocástico Gaussiano no-estacionario, con parámetros estadísticos dependientes de la magnitud y distancia. En la Figura 4.7 se muestra dos historias de aceleración simulada obtenidas en cada estación comparada con la observada para el evento objetivo. Se puede observar que no hay una buena aproximación en las historias de tiempo entre las obtenidas con el Método 3 y las observadas. Sin embargo, el Método 3 provee una buena estimación de la esperanza de las intensidades del espectro de Fourier y de respuesta (línea delgada) para sitios cercanos e intermedios a la fuente con respecto la observada (línea gruesa); pierde precisión para sitios lejanos de la fuente.

El Método 3 puede considerarse útil en aplicaciones para predecir movimientos de suelo para intervalos de magnitudes y distancias en donde no existe estaciones instrumentadas; además podría ser muy práctico su uso cuando se use el Método 5: la técnica de funciones de Green empíricas.

4.5 Método 4: Usar método estocástico

Este método es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo para regiones del mundo en las cuales registros de movimientos sísmicos potencialmente perjudiciales no son disponibles. El método combina descripciones paramétricas o funcionales del espectro de amplitudes del movimiento del suelo con un espectro de fase aleatorio modificado (ver Boore 1988, 2003). El método necesita parámetros sismológicos los cuales son presentados en la Tabla 1 del apéndice 3. El momento sísmico para el evento objetivo es $M_{0s}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_s=150$ bar (ver Tabla 1 del apéndice 3). Otros parámetros para considerar la atenuación son mencionados dentro del texto del apéndice 3. Para considerar la duración dependiente de la magnitud y distancia es usada la expresión

propuesta por Reinoso y Ordaz (2001). No se considera el factor por efectos de sitio, porque en estos sitios elegidos no existen efectos de sitio (excepto en la estación TEAC). En la Figura 4.8 se muestra las historias de aceleración obtenidas con el Método 4 y las registradas durante el evento objetivo. Se puede observar que para estaciones relativamente cercanas a la fuente (*p.e.* AZIH) la predicción es muy mala debido a que no se considera efectos de directividad en el modelo. En estaciones intermedias y lejanas (excepto estación TEAC) la predicción es relativamente aceptable para periodos mayores a 0.6 segundos. Esto es debido posiblemente a que existen efectos de sitio, en todas las estaciones, los cuales resultan importantes en periodos estructurales bajos ($T < 0.6$ seg). Esto se puede observar en la predicción del espectro de respuesta esperado debido al Método 4. Se observa que el espectro de respuesta calculado con el método 4 es aceptable para periodos estructurales mayores a 0.6 seg; sin embargo, para periodos menores al mencionado, se subestiman las ordenadas sísmicas. Por lo tanto, en lo posible, se debe incluir efectos de sitio al utilizar este tipo de método.

4.6 Método 5: Utilizar técnica de funciones de Green empíricas

Se usa la técnica de funciones de Green empíricas (Ordaz *et al.* 1995) y una expresión para modificar la función de Green por atenuación (Jaimes *et al.* 2006a) para generar historias de aceleración producidas por el sismo del 19 de Septiembre de 1985 usando como funciones de Green empíricas los registros del evento del 21 de Septiembre de 1985. En la Figura 3.1 del capítulo 3 se muestra las historias de aceleración, así como las historias de aceleración resultado de este método. En general, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 3 y apéndice III el método muestra una buena aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica; sin embargo, en estaciones cercanas a la fuente el método pierde precisión, posiblemente a los efectos de directividad.

4.7 Discusión

Se presentaron cinco métodos para obtener historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Estos métodos han sido usados en muchos estudios para evaluar el comportamiento de estructuras, y en el análisis de riesgo sísmico en muchos sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender su aplicación y limitaciones es muy importante para el futuro uso de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, escalando acelerogramas existentes de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad, presenta una buena aproximación con respecto al evento objetivo en amplitud; sin embargo, no toma en cuenta el cambio respectivo en el contenido de frecuencia y duración en las historias de aceleración. Esto es importante cuando se desea conocer el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis. Por otro lado, un sismo de magnitud pequeña tiene una forma espectral diferente a la de un sismo con mayor magnitud; el escalamiento, que se da de manera física, resulta muy diferente. La región sísmica también influye de manera importante en el escalamiento del movimiento sísmico. Cuando, se usan registros provenientes de la misma región sísmica, los resultados son aceptables y es posible obtener intensidades similares a un evento ocurrido en la región. Por otro lado, si es usado un movimiento registrado de una región diferente a la requerida, tal efecto resulta importante. Por lo tanto, no es aconsejable usar registros para escalar de otra fuente sísmica que no sea la deseada. Otro problema con el Método 1 es que necesita un registro confiable, y no es el caso para muchos sitios.

El Método 2 usa un procedimiento que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a la correspondiente amplitud del espectro de respuesta de aceleraciones objetivo. Este método usa la teoría de vibraciones aleatorias, junto con una duración del movimiento fuerte, pasos que

introducen aproximaciones que reducen su confiabilidad. Además, el Método 2 asume un proceso estacionario, por lo tanto la señal generada no tiene la apariencia de sismos reales y, de acuerdo a lo señalado por Naiem y Lew (1995), se sobreestiman las demandas de desplazamiento y la energía de entrada al sujetar una estructura a estos movimientos.

En el Método 3, las intensidades espectrales son semejantes a las observadas, pero al obtener los eventos simulados, el Método 3 no es capaz de representar señales semejantes a la señal objetivo, debido a las restricciones impuestas en la función moduladora de amplitud y frecuencia. Sin embargo, el Método 3 puede considerarse útil en aplicaciones para predecir intensidades sísmicas para intervalos de magnitudes y distancias en donde no existe estaciones instrumentadas; además podría ser muy práctico su uso cuando se use el Método 5: la técnica de funciones de Green empíricas.

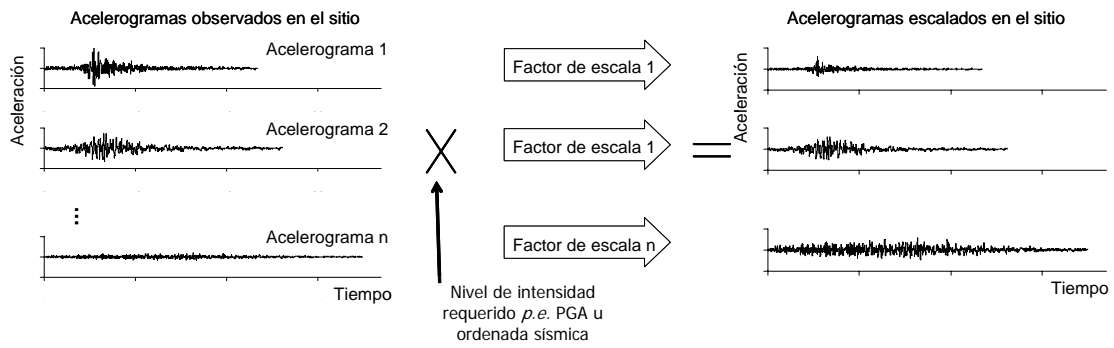
El Método 4 es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo en sitios en los cuales los registros de movimientos no están disponibles. Las características esenciales es que toman en cuenta varios factores que afectan al movimiento del suelo (fuente, dirección y sitio) dentro de formas funcionales simples. Por lo tanto, el Método 4 debe ser usado cuando los registros de movimientos no están disponibles. Pero, si existen registros en el lugar, otros métodos se deben usar.

De los resultados presentados en este trabajo, es claro que usar el Método 5 para casi cualquier sitio instrumentado (excepto cerca de la fuente) es la mejor manera para obtener historias de aceleración. Para sitios no instrumentados, es posible aplicar el Método 5, con ayuda del Método 3 o Método 4. Con alguno de estos dos métodos se generan movimientos sísmicos, que se consideran como funciones de Green; a las cuales se le aplica la técnica de funciones de Green y se obtiene una señal simulada (Kamae *et al.* 1991; Aguirre, 2005).

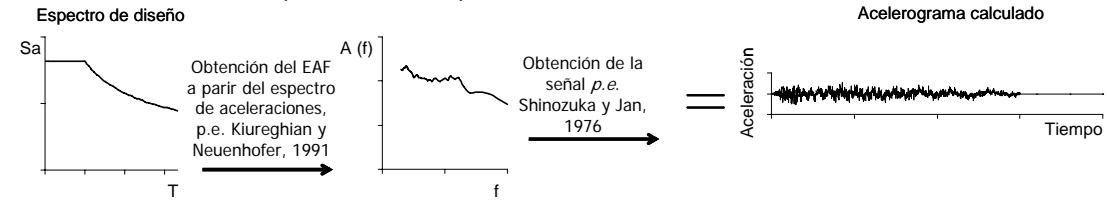
Tabla 4.1 Estaciones, distancias y sismos usados en la dirección EW. También es indicado el factor de escala, F_{esc} , al usar el Método 1

Estación	Lat.	Lon.	19/09/85		21/09/85			25/04/89		
			PGA (cm/s ²)	R (km)	PGA (cm/s ²)	F_{esc}	R (km)	PGA (cm/s ²)	F_{esc}	R (km)
ATYC	17.211	100.431	59.44	134	74.79	0.79	99	16.04	3.71	127
AZIH	17.603	101.455	161.10	33	133.14	1.21	28	-	-	-
CAYA	17.045	100.266	48.43	159	45.78	1.06	121	22.69	2.13	101
COYC	16.968	100.084	34.97	181	42.12	0.83	143	85.18	0.41	80
CPDR	16.769	99.633	15.63	235	12.44	1.26	198	92.93	0.17	27
OCTT	17.250	99.511	55.80	224	-	-	-	-	-	-
PAPN	17.328	101.040	116.65	76	243.09	0.48	30	-	-	-
PARS	17.344	100.214	89.00	147	-	-	-	102.20	0.87	118
SUCH	17.226	100.642	81.37	114	86.13	0.94	76	-	-	-

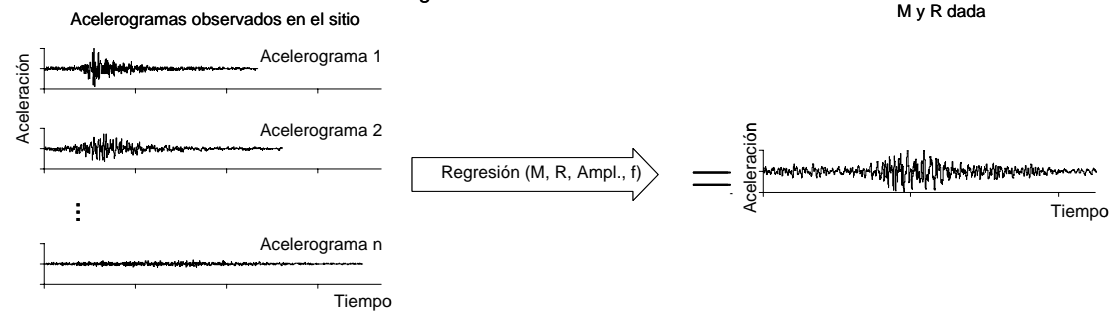
Método 1: Escalar acelerogramas de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad



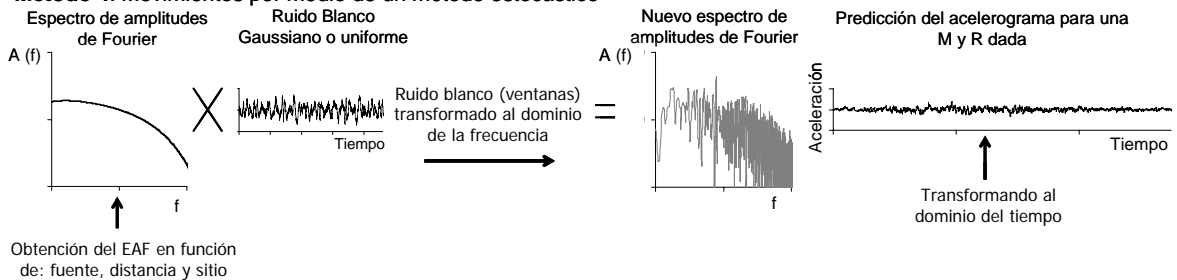
Método 2: Movimientos compatibles con un espectro de diseño



Método 3: Movimientos usando funciones generalizadoras



Método 4: Movimientos por medio de un método estocástico



Método 5: Movimientos con la técnica de funciones de Green empíricas

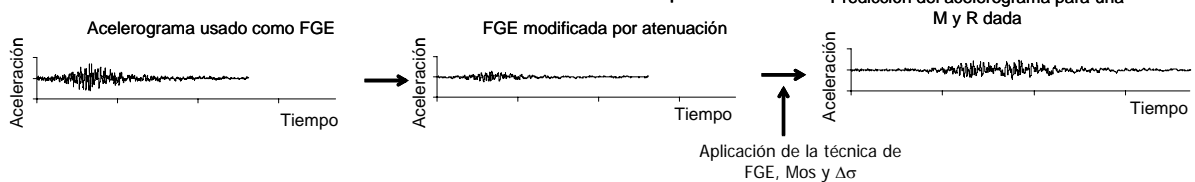


Figura 4.1. Diagrama de los métodos usados en este trabajo para obtener historias de aceleración con propósitos de diseño. Las figuras corresponden al sitio COYC pero fue aplicado a todos los sitios

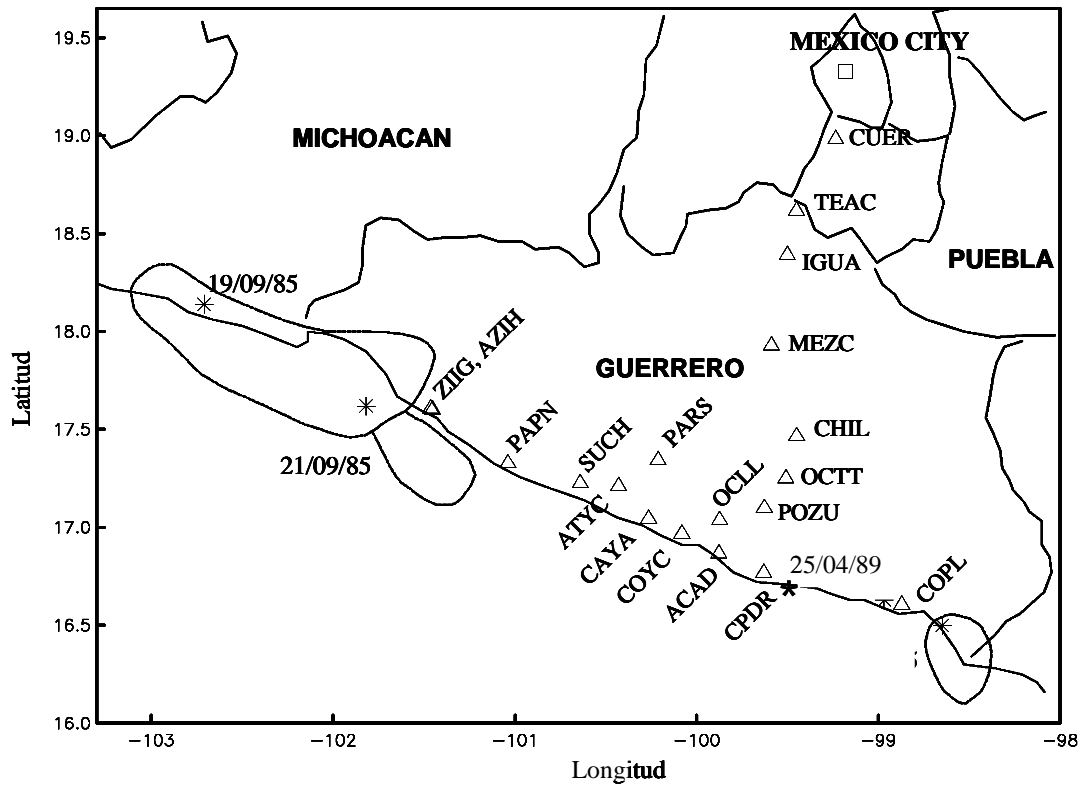


Figura 4.2. Mapa del sureste de México mostrando la localización de estaciones fuera del valle de México, y epicentros y áreas de ruptura de los eventos mostrados en la Tabla 4.1

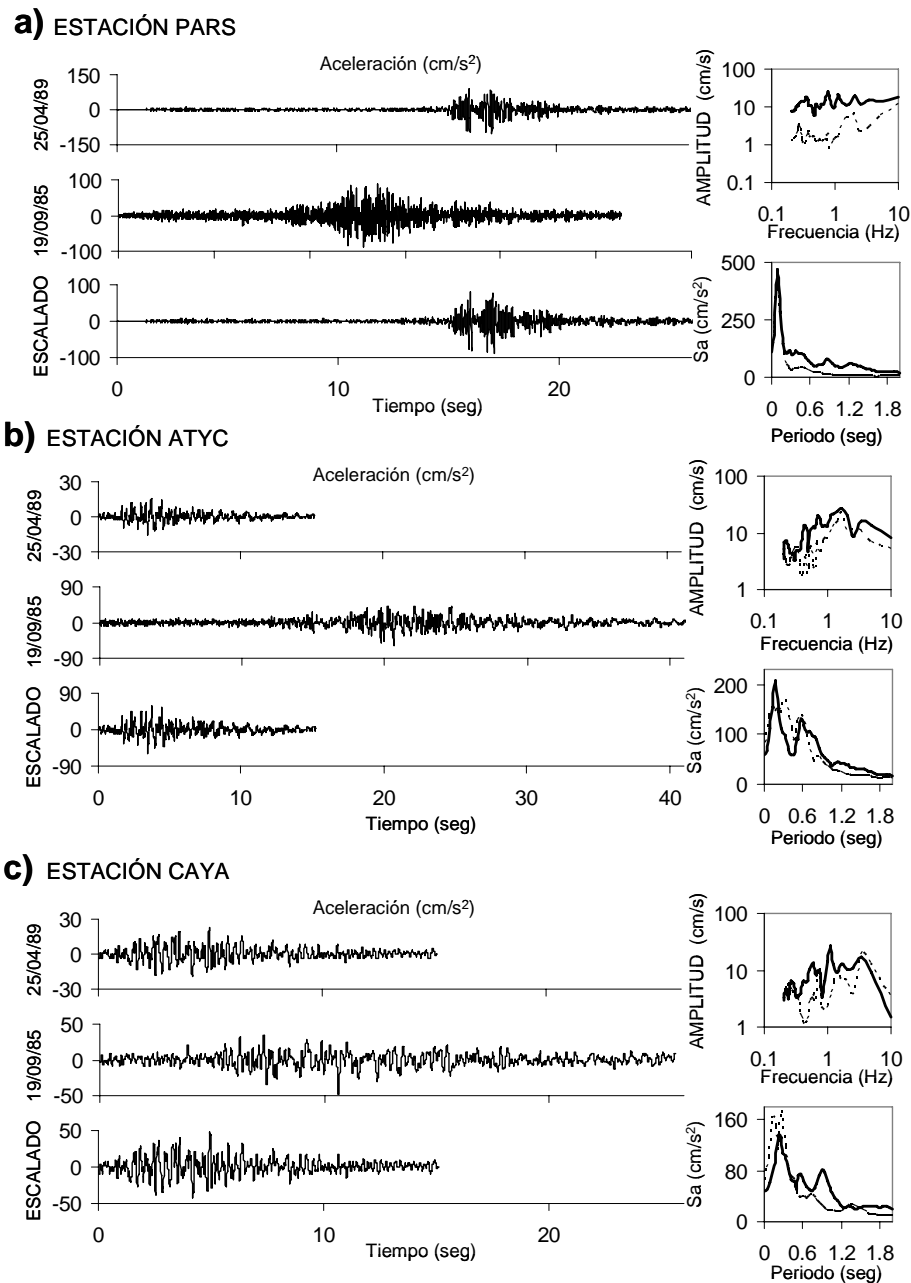


Figura 4.3. Historias de aceleración para estaciones (a) PARS, (b) ATYC y (c) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 25 de Abril de 1989 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

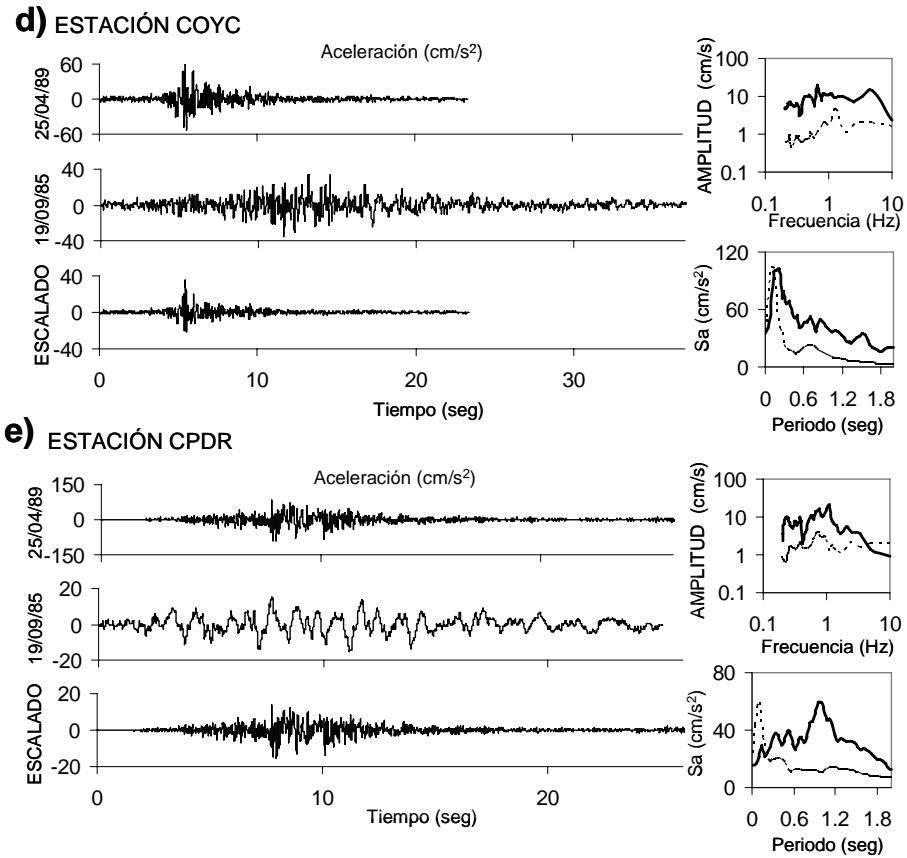


Figura 4.3. (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) COYC y (e) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 25 de Abril de 1989 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

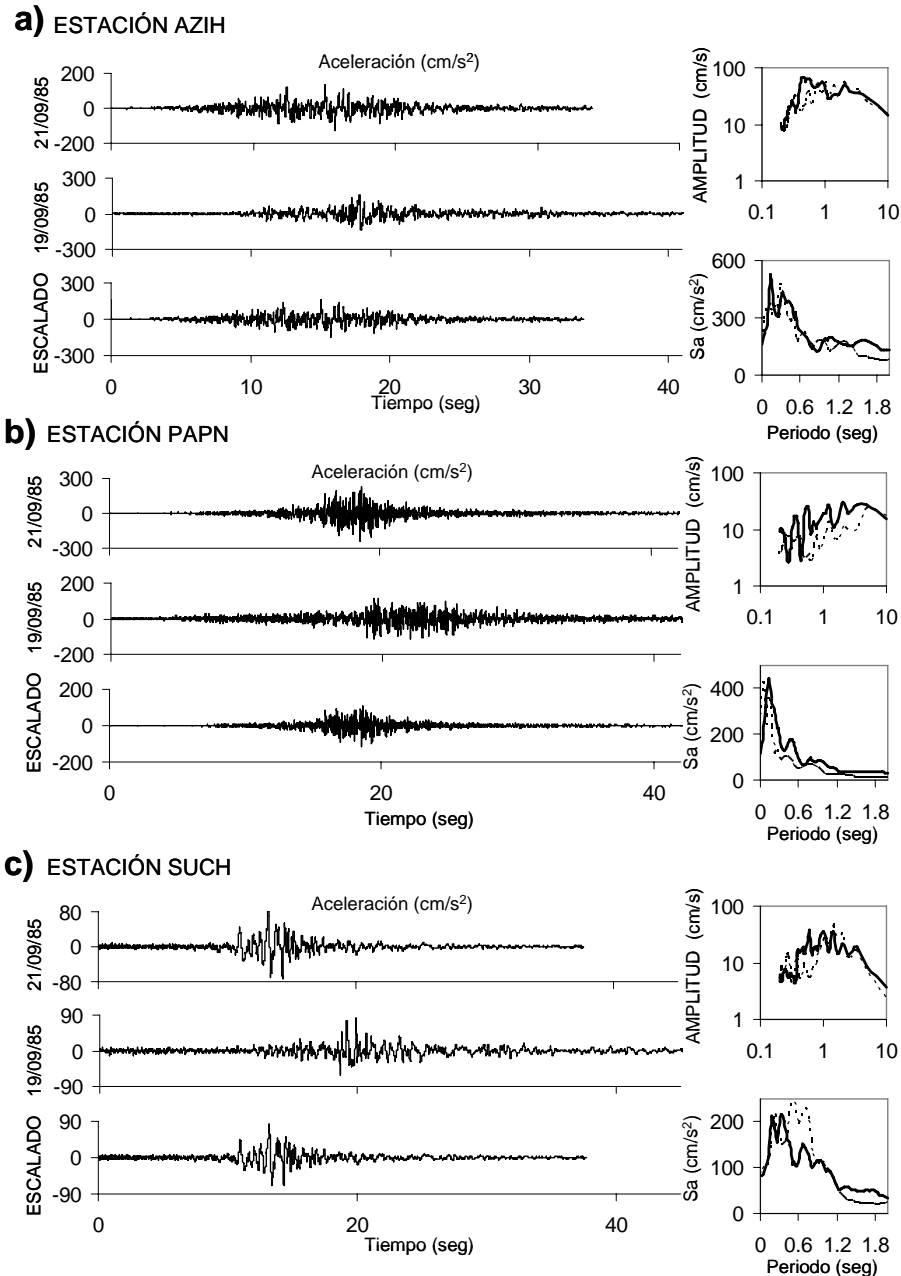


Figura 4.4. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 21 de Septiembre de 1985 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

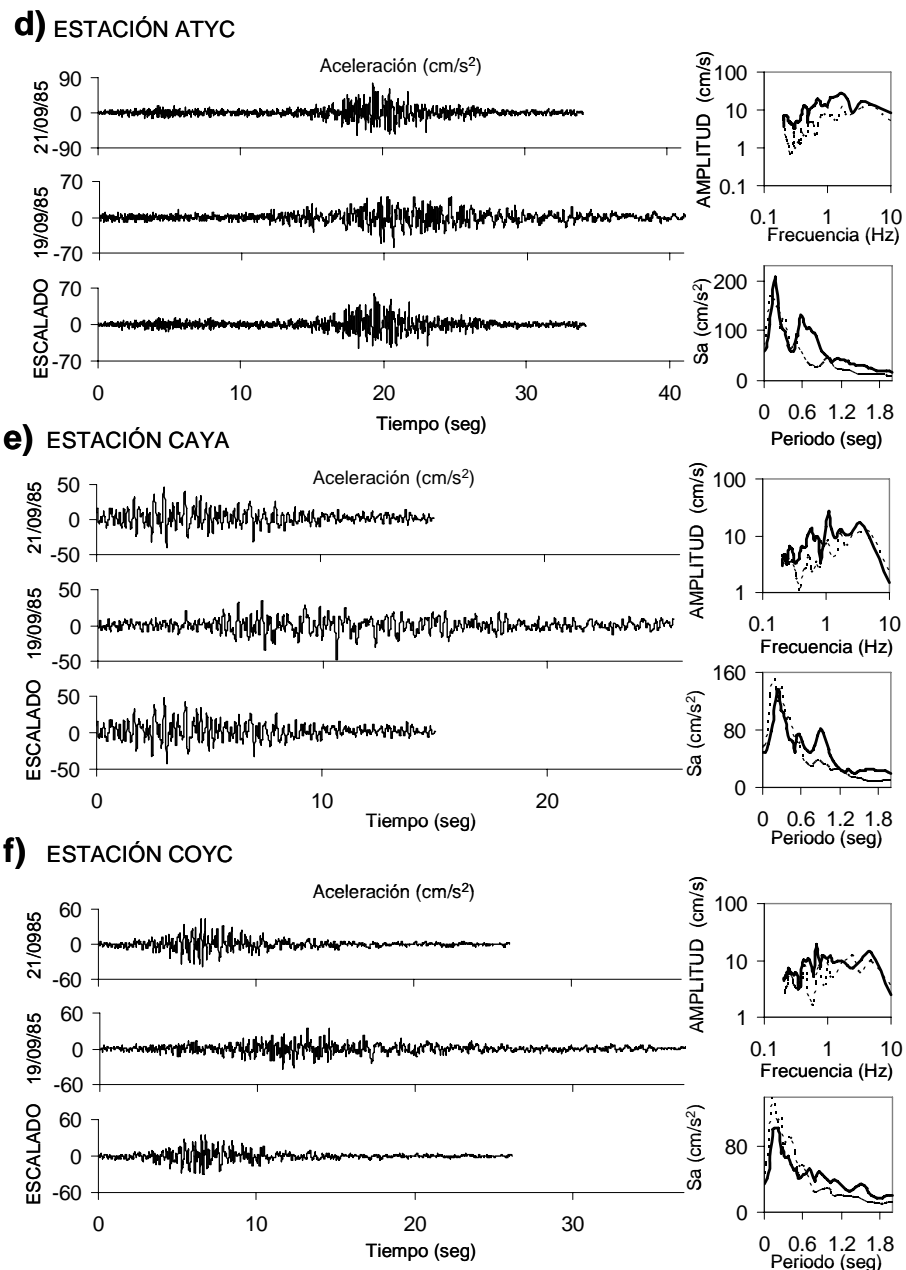


Figura 4.4. (continuación) Historias de aceleración para estaciones (d) ATYC, (e) CAYA y (f) COYC, (ver figura 4.2) del evento del 21 de Septiembre de 1985 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

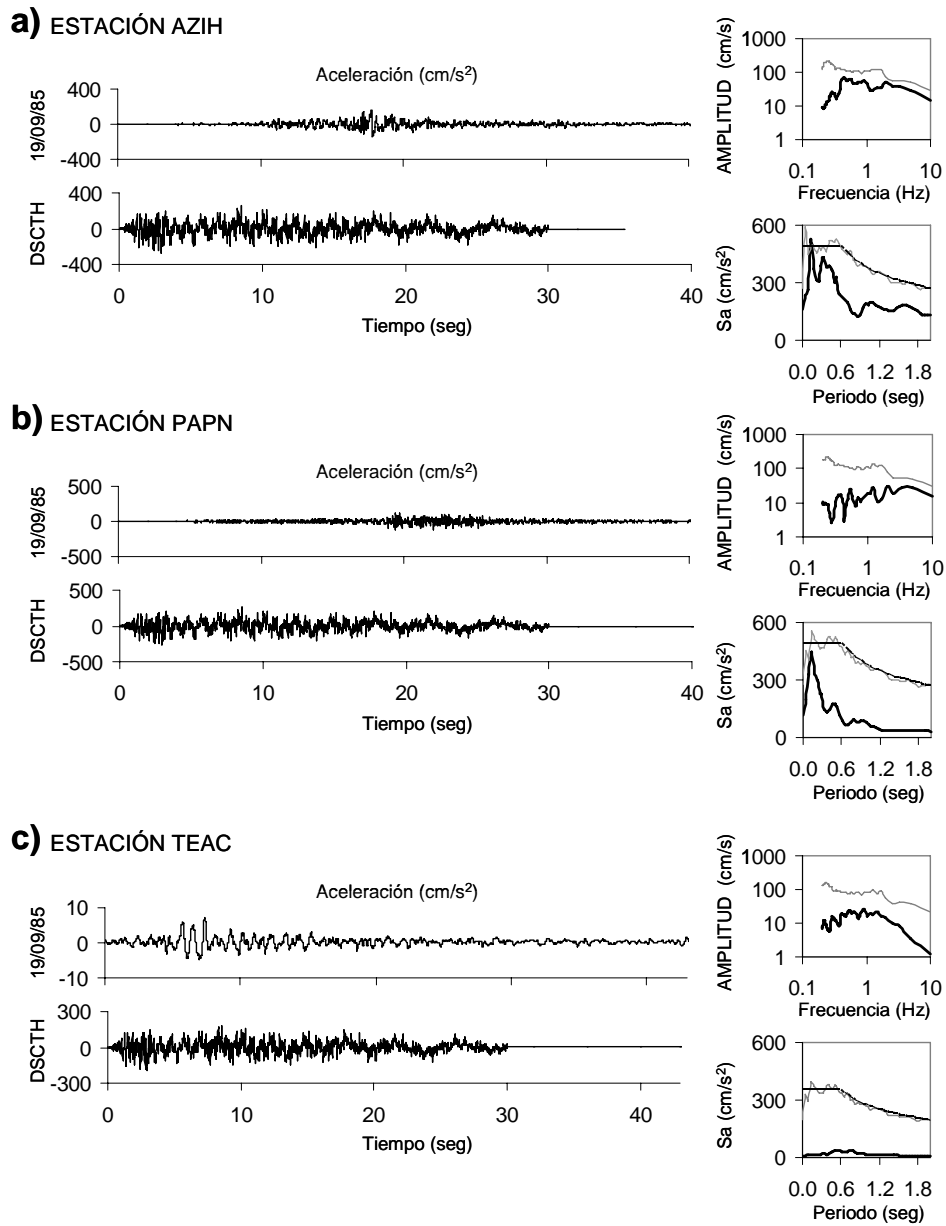


Figura 4.5. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y el evento compatible con el espectro de diseño en el sitio (Método 2, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del obtenido con el Método 2 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de diseño (línea continua) y el espectro de respuesta del método 2 (pseudoaceleración, 5 % amortiguamiento, línea discontinua)

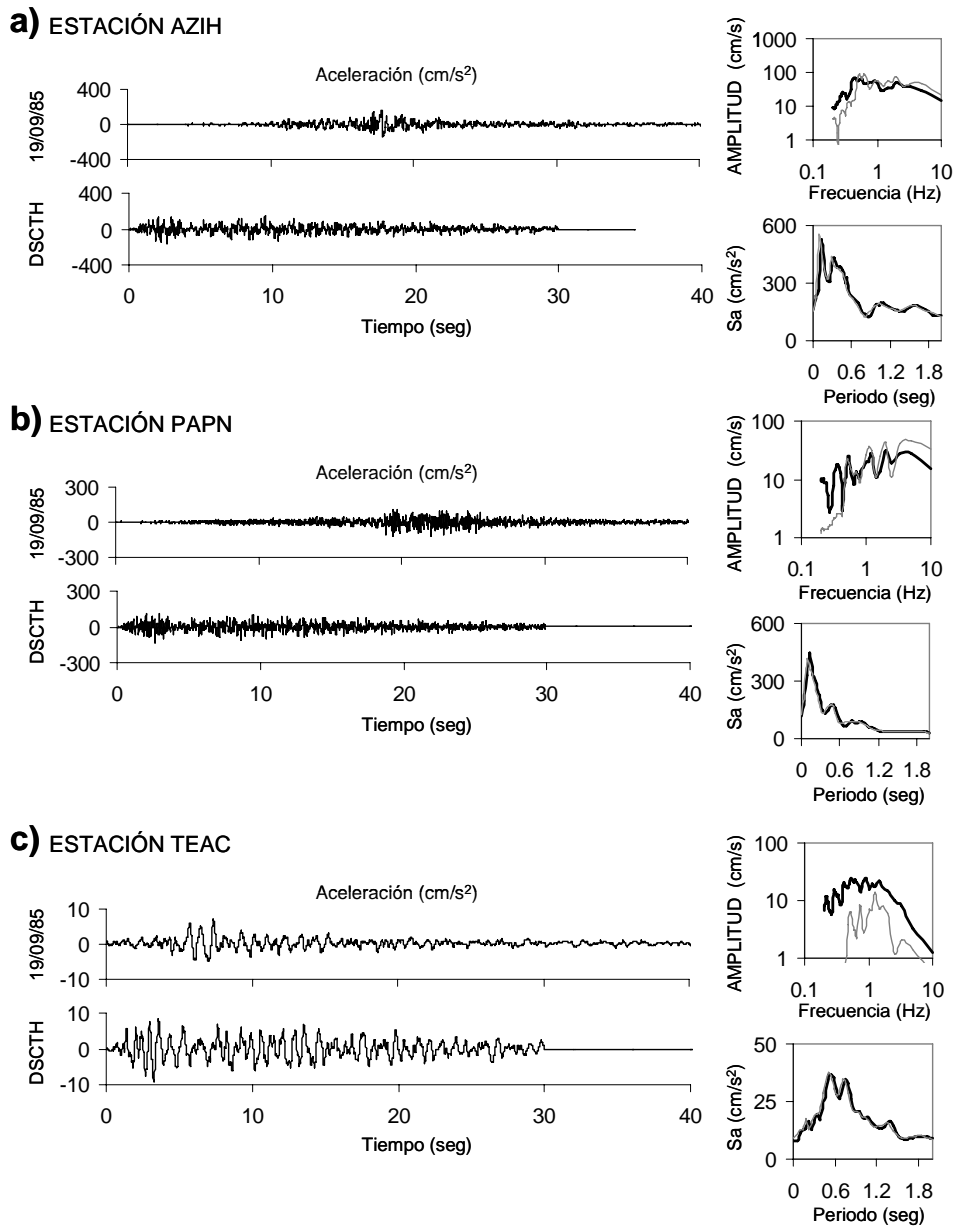


Figura 4.6. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y el evento compatible con el espectro de respuesta del evento objetivo en el sitio (Método 2, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del obtenido con el Método 2 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y obtenido con el Método 2

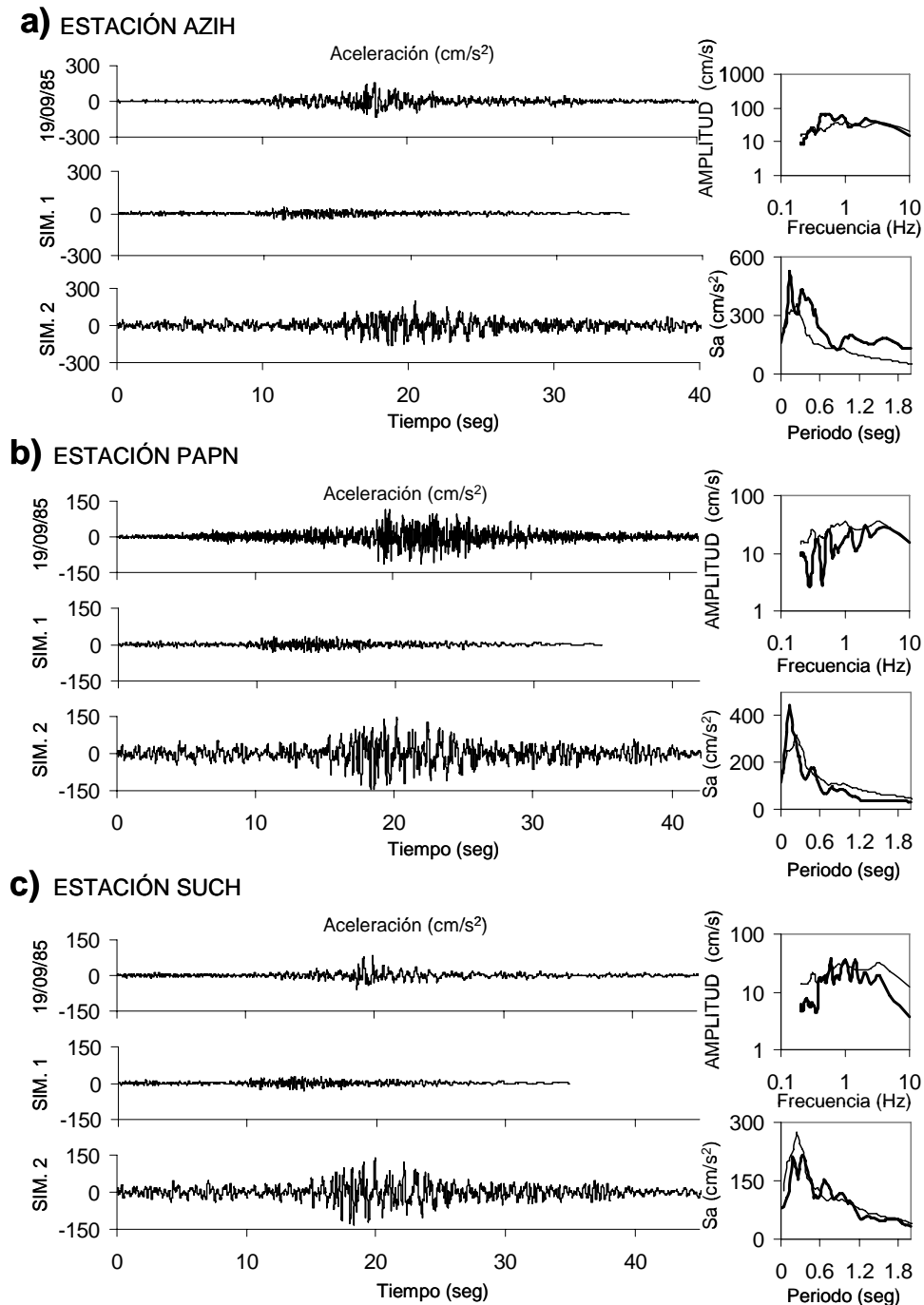


Figura 4.7. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

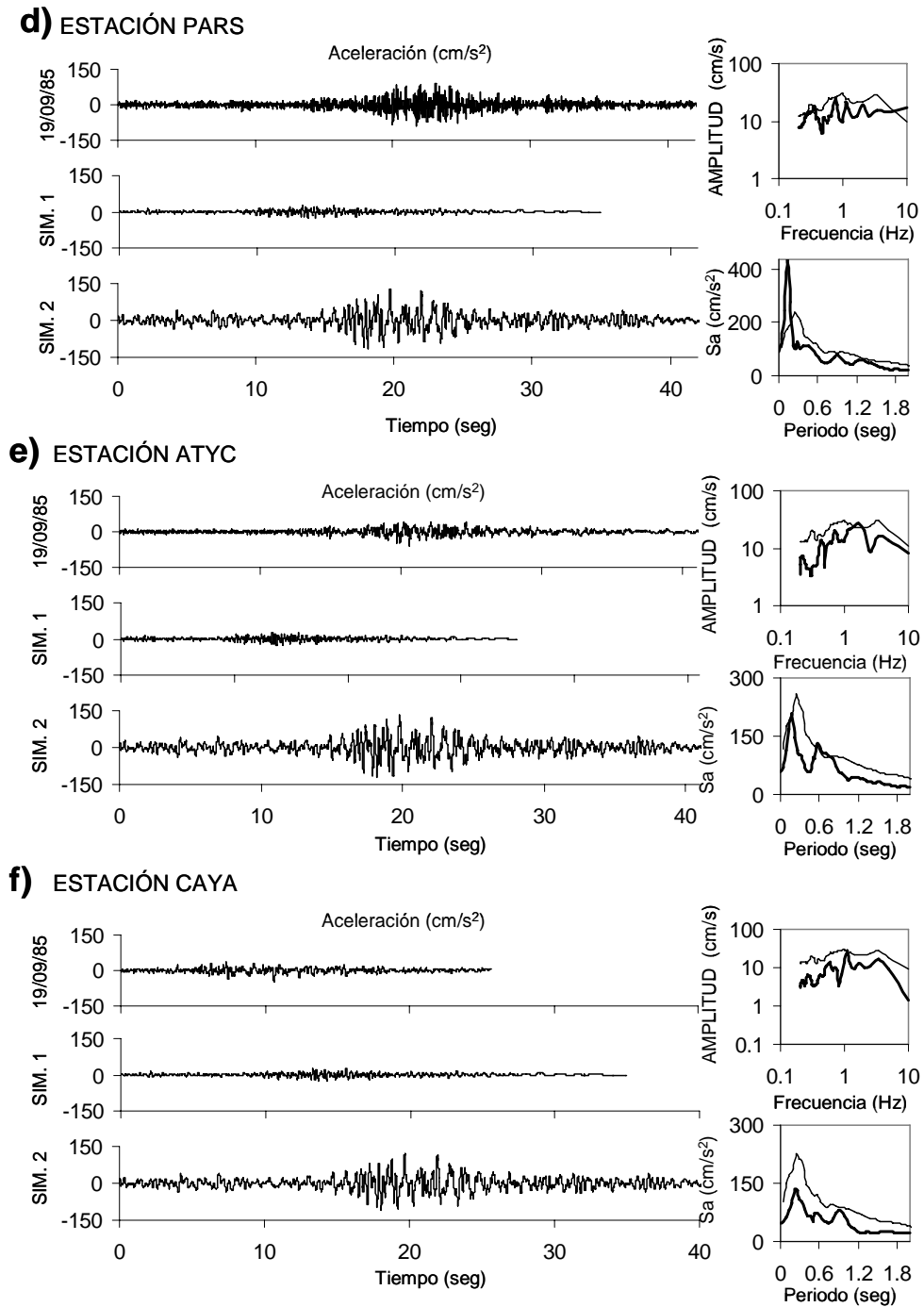


Figura 4.7. (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) PARS, (e) ATYC y (f) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

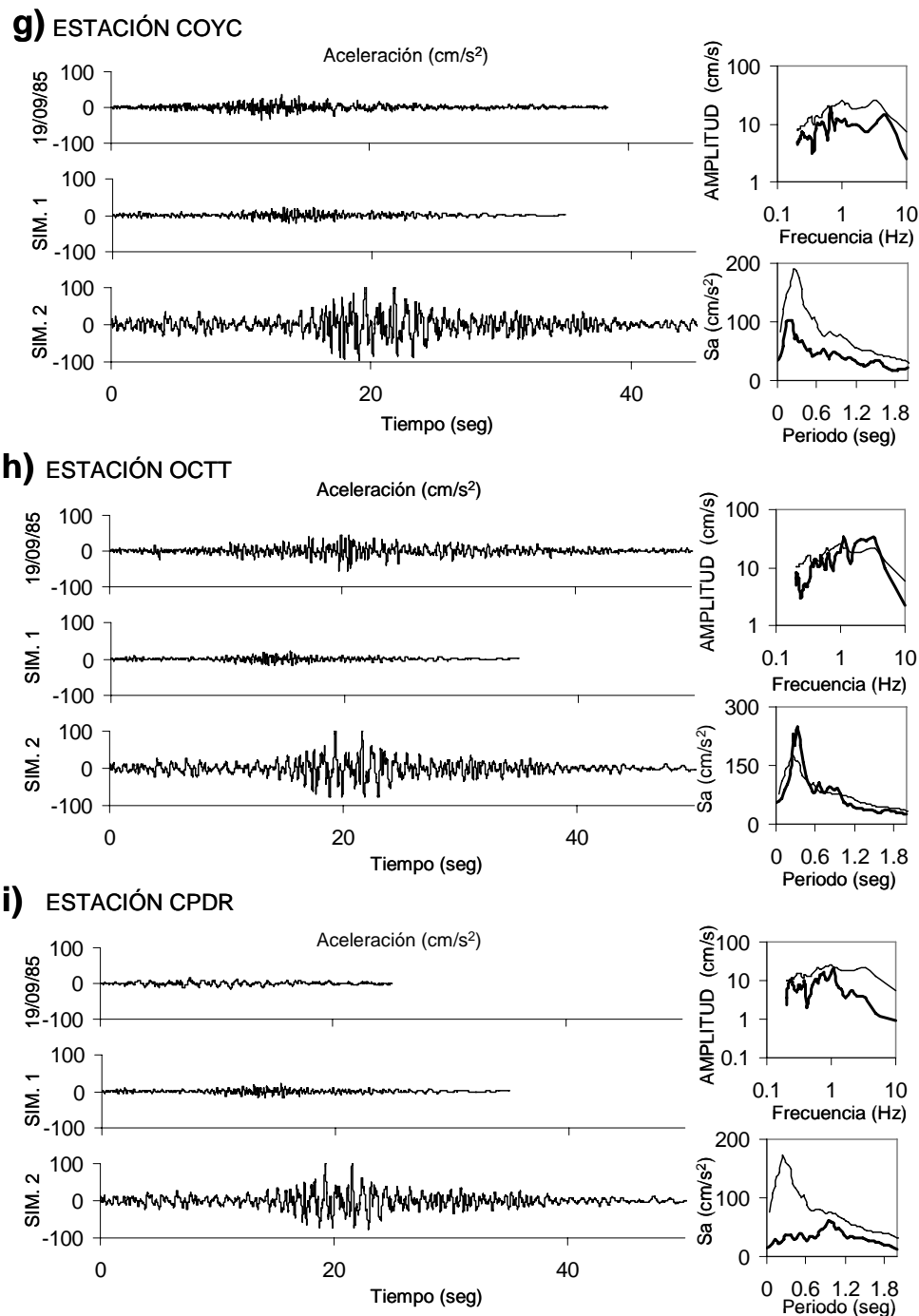


Figura 4.7 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) COYC, (h) OCTT y (i) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

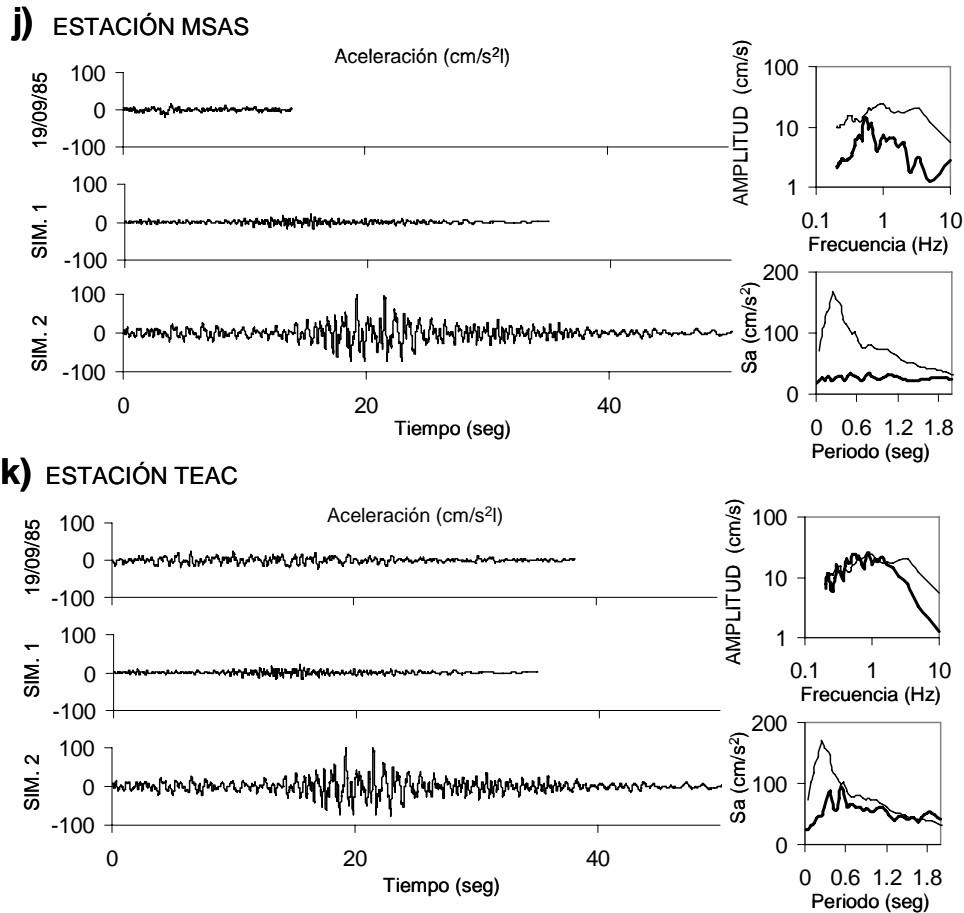


Figura 4.7 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) MSAS y (k) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

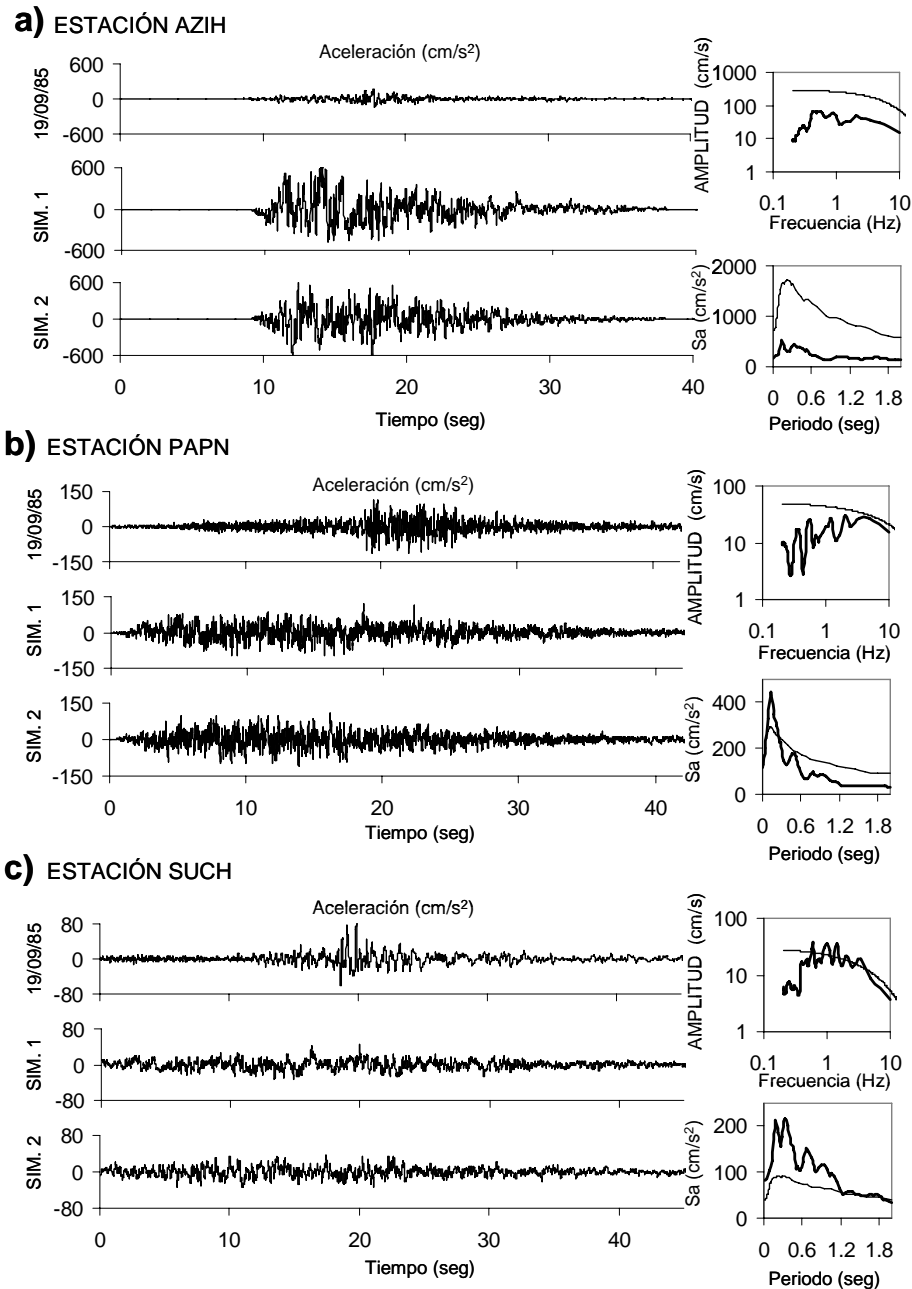


Figura 4.8. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

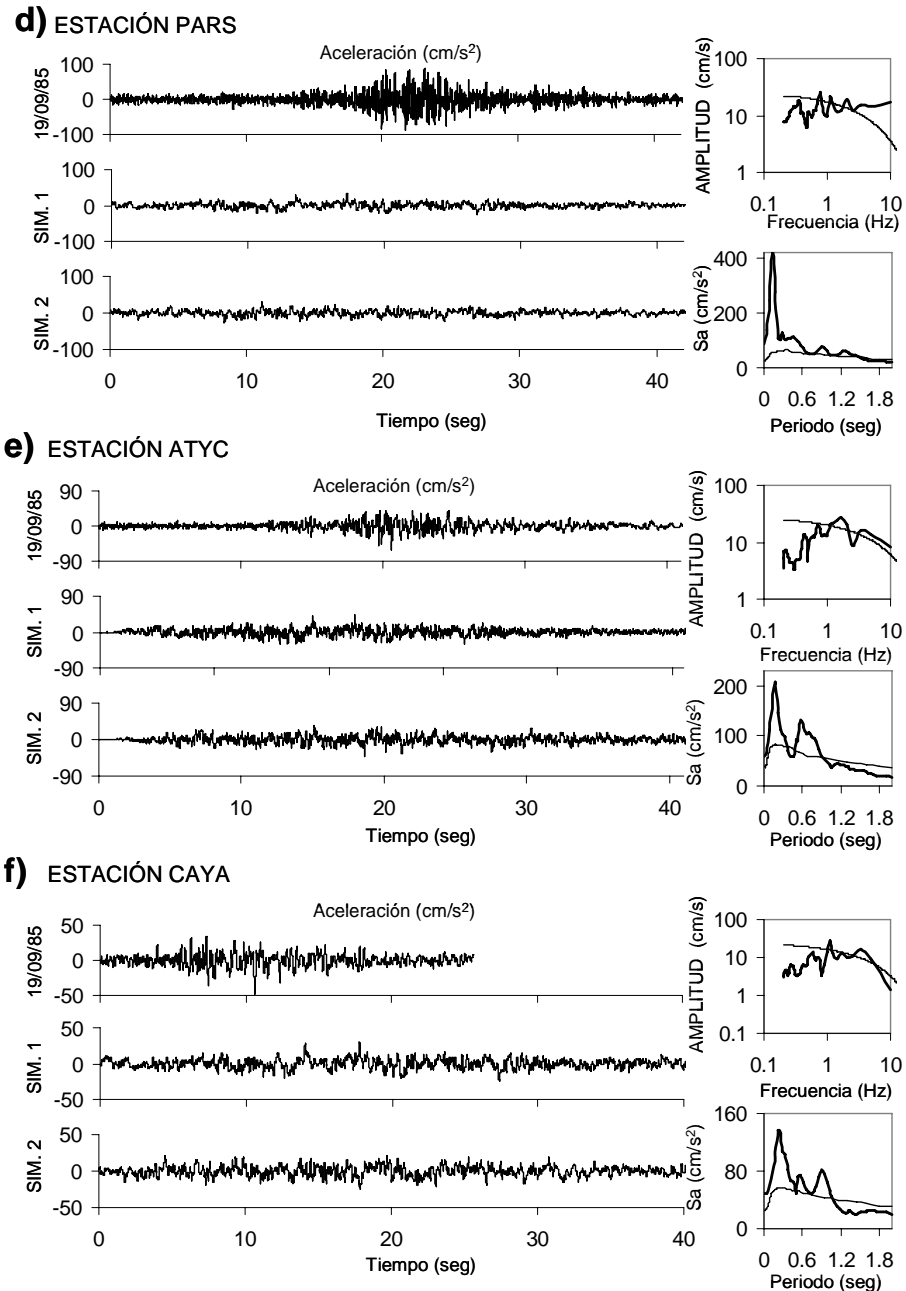


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) PARS, (e) ATYC y (f) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

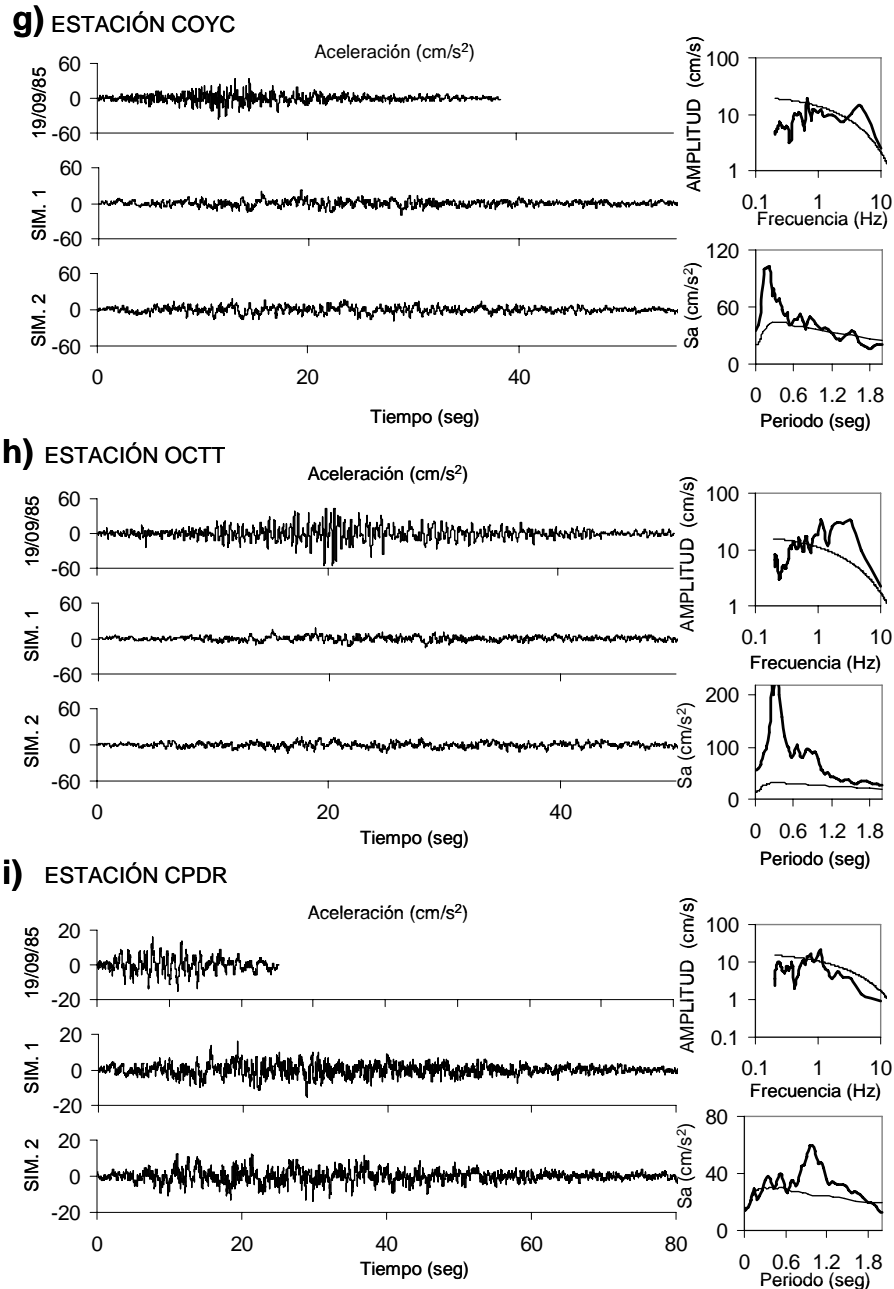


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) COYC, (h) OCTT y (i) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

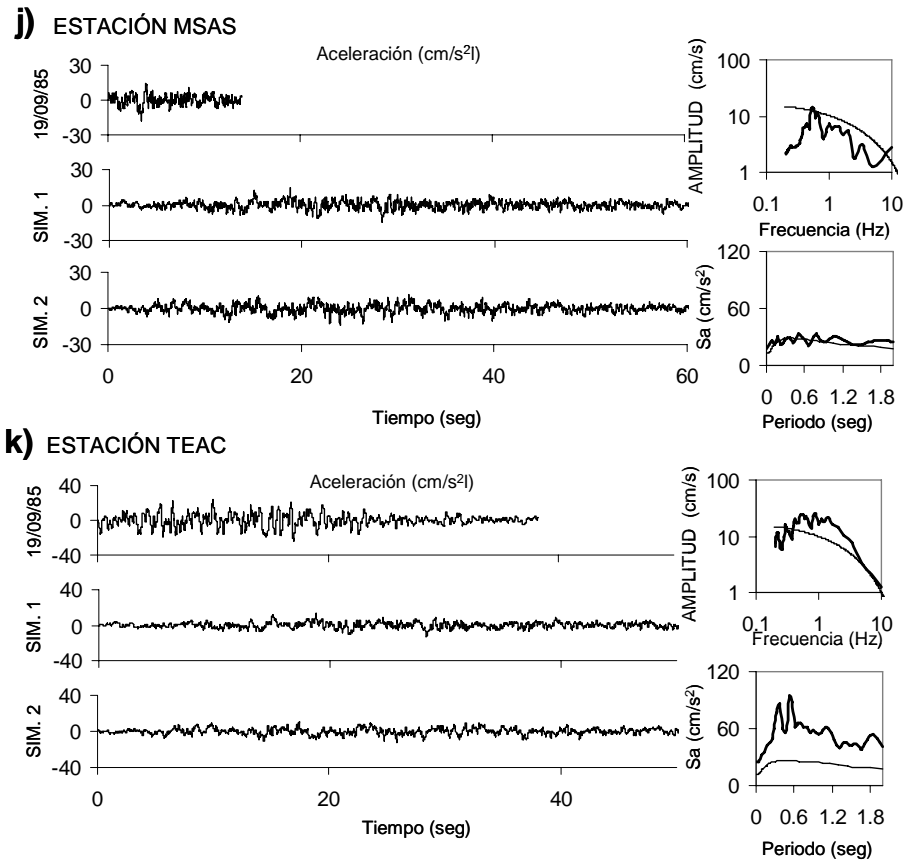


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) MSAS y (k) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

Capítulo 5

Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas: el caso de terreno firme en la Ciudad de México

En este capítulo se propone una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa un sitio en terreno firme de la Ciudad de México como ejemplo. Se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica y eventualmente ser incluidos en el código. Los movimientos de diseño se calculan de tres fuentes sísmicas: local, subducción (brecha de Guerrero) y profundidad intermedia (zona centro de México) que representan el mayor peligro sísmico para la Ciudad de México.

5.1 Importancia de los acelerogramas con propósitos de diseño

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 diseño que consideran fuerzas relacionadas a parámetros de respuesta máxima como la aceleración espectral y el desplazamiento. Estos parámetros no siempre tienen una correlación directa con pérdida y 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 ser considerado. Eso es por lo que deben usarse 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 disponibles y manuales son vagos, ellos regularmente solo mencionan que los acelerogramas deben ser compatibles con los espectros de diseño y apropiados a la situación. El criterio implementado por los reglamentos actuales no contiene información suficiente para los ingenieros, por lo que ellos no pueden usar métodos prácticos para generar acelerogramas de diseño, y ellos terminan usando cualquiera que esté disponible y, en muchos casos, poco útil para la estructura específica que ellos están analizando. Más detalles acerca de los diferentes métodos, usuales, para general acelerogramas con propósitos de diseño se incluyen en el capítulo 4 de esta tesis y en las referencias allí contenidas.

Los ingenieros pueden usar cualquiera de los métodos mencionados en el capítulo 4 de la tesis para obtener acelerogramas para analizar sus estructuras, pero ellos deben ser conscientes que cada sitio es afectado por muchas fuentes sísmicas, y por lo tanto se necesitan varios acelerogramas para predecir la respuesta que la estructura tendrá en su vida útil (ver capítulo 1). Es más, es posible esperar movimientos sísmicos diferentes debido a las variaciones e incertidumbres en los parámetros (sismológicos, modelos de simulación y otros). Esta información es incluida 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 ya que ellos normalmente usan el espectro de diseño, el cual en ciertas ordenadas está sobreestimado; por consiguiente, la forma más práctica es encontrar una familia de acelerogramas que ajuste el EPU y hacerlos disponibles a los ingenieros. Estos acelerogramas

ajustados al EPU están asociados a un peligro sísmico constante; no son acelerogramas para obtener un riesgo sísmico constante.

En lo que sigue, se determinan las fuentes sísmicas principales que producen movimientos de suelo fuerte en un sitio. Se obtiene, usando una técnica de desagregación del peligro sísmico probabilístico (Chapman, 1995), los valores más probables de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa de excedencia. Esto permite seleccionar movimientos de suelo que representan los movimientos más probables del peligro sísmico para un parámetro de movimiento y un nivel de peligro dado. Se usa el método de simulación de funciones de Green empíricas (Ordaz *et al.* 1995) modificado por atenuación. También, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo un ejemplo, el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un ejemplo excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas. Más detalles acerca de la aplicación pueden ser obtenida en el apéndice IV y las referencias ahí contenidas

5.2 Metodología propuesta

La metodología consiste en los siguientes pasos:

- 1) Realizar un análisis probabilístico del peligro sísmico incorporando, si es necesario, efectos de sitio lineal o no lineal del sitio, para determinar las fuentes sísmicas que más afectan al sitio.
- 2) Se realiza un análisis de desagregación probabilístico del peligro sísmico, para encontrar la magnitud y distancia que más probabilidad presentan ciertos eventos sísmicos, que genera una intensidad sísmica seleccionada asociada a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno).
- 3) Para generar los movimientos sísmicos, se debe usar un método de simulación confiable para para el escenario sísmico determinado en el paso 2, que en lo posible considere los efectos de sitio.
- 4) Proponer un número mínimo de movimientos de diseño y para cuáles periodos estructurales deben ser usados para que la respuesta de los movimientos esperados fijen el espectro de peligro uniforme.

Estos acelerogramas obtenidos que se ajustan al espectro de peligro uniforme del sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico; por lo tanto se consideran movimientos sísmicos asociados a un peligro sísmico constante, asociados a un periodo de retorno; por lo tanto estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos de riesgo sísmico constante. En el final de este capítulo se presenta una discusión acerca de las limitaciones al aplicar la metodología antes mencionada.

5.3 Ejemplo de aplicación. Terreno firme de la Ciudad de México

A continuación se presenta una aplicación al caso de terreno firme de la Ciudad de México de la metodología planteada anteriormente. Por razones de espacio solo explicaremos de forma breve, el ejemplo. Mayores detalles pueden ser obtenidos del apéndice V y las referencias ahí contenidas.

5.3.1 Fuentes sísmicas

Existen varios lugares en el mundo que son afectados por diferentes fuentes sísmicas y varios movimientos sísmicos se deben usar para cubrir todas las posibilidades de movimientos de suelo

fuertes. La Ciudad de México no sólo es uno de más desafiantes ejemplos debido a los muy bien conocidos efectos de sitio sino también porque es afectado por varias fuentes sísmicas diferentes.

El peligro sísmico en Ciudad de México se relaciona a tres fuentes sísmicas: subducción, profundidad intermedia y terremotos continentales o locales. Todos ellos han causado en el pasado pérdidas económicas y fatalidades. La Figura 1 del apéndice IV muestra los límites y ubicación de las principales fuentes sísmicas de subducción y profundidad intermedia; también se muestra, junto con su fecha y magnitud, la ubicación de epicentros de algunos sismos de subducción (rectángulos) y profundidad intermedia (triángulos) usados en este estudio.

El crecimiento de Ciudad de México ha originado un desarrollo urbano importante al sur, donde se han construido recientemente centros comerciales, de negocio, educativos y residenciales y puentes. La estación Ciudad Universitaria (CU) se localiza en esta área y es considerada como el principal sitio de referencia sísmico porque desde 1964 CU ha registrado más de 20 terremotos moderados e intensos ($M > 6.0$). Esto hace a CU la más prolífica estación acelerométrica en el mundo, que permite hacer buenas predicciones del movimiento esperado en la Ciudad de México (ver capítulo 2).

5.3.2 Espectro de peligro uniforme

Para la selección de los movimientos sísmicos de diseño es deseable contar con un análisis probabilístico del peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) (Cornell, 1968; Esteva, 1970) dada por la ec. (5.1),

$$v(y) = \sum_k w_k \int_{M_o}^{M_u} f_M(m) P(Y > y | m, r) dm \quad (5.1)$$

donde w_k , es la suma de los pesos asignados a las diferentes fuentes sísmicas, k ; M_o y M_u son la magnitud mínima y máxima que se puede generar en la fuente sísmica k , respectivamente; $f_M(m)$ es la función de densidad de probabilidad de la magnitud, $P(Y > y | m, r_{i,j})$ es la función de densidad de probabilidad condicional que la intensidad sísmica, Y , exceda el valor de la intensidad, y , en el sitio.

Esto nos permite obtener la frecuencia con la cual la característica de un sismo (*p.e.* la aceleración máxima del suelo, la duración, la ordenada espectral) es más grande que un valor especificado durante un cierto tiempo. De esta manera, es posible incluir todas las posibles fuentes sísmicas que pueden afectar la zona, tomando en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias. La salida de un PSHA es una o más curvas de peligro sísmico que relacionan parámetros del movimiento fuerte para un periodo de retorno en el sitio.

Se calcularon las curvas de peligro sísmico en terreno firme de la Ciudad de México, dadas en términos de tasas de excedencia para pseudo-aceleraciones espectrales, para periodos estructurales entre 0 y 4 seg. Se usaron las fuentes sísmicas previamente mencionadas y tres diferentes leyes de atenuación para calcular el riesgo sísmico con el software de CRISIS 2003: *i*) para los sismos de subducción se usó la relación derivada por Jaimes *et al.* (2006c) que es obtenida utilizando 26 acelerogramas registrados en la estación de CU, *ii*) para los sismos de profundidad intermedia se empleo una ley de atenuación presentada por Montalvo *et al.* (2002), y finalmente, *iii*) para el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano se utilizo la relación de Sadigh *et al.* (1997). En el apéndice IV (Figura 2) se muestran las curvas de

peligro sísmico en términos de pseudo-aceleración espectral (5% de amortiguamiento) en CU para dos periodos estructurales ($T=0.2$ y 2 seg). Las figuras corresponden a las fuentes sísmicas siguientes: subducción (líneas continuas delgadas), profundidad intermedia (líneas continuas gruesas), local (líneas discontinuas delgadas) y la contribución total de todas las fuentes sísmicas (líneas grises gruesas). Se puede observar que el peligro sísmico para las estructuras con periodo alrededor de 0.2 seg (ver Fig. 2a del apéndice IV) es dominado por las fuentes de profundidad intermedia (líneas continuas gruesas), y para las estructuras con $T=2$ seg (ver Fig. 2b del apéndice IV) es dominado por fuentes de subducción (líneas continuas delgadas). Eventos de origen local (líneas discontinuas delgadas) también pueden afectar estructuras con periodo corto. Todas estas diferencias también son ratificadas cuando se habla sobre las historias de tiempo.

De las curvas de peligro sísmico es posible obtener el espectro de peligro uniforme (EPU) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo del retorno). Se construyó el EPU para un periodo de retorno de 125 (línea delgada) y 475 años (línea gruesa) (ver Fig. 3 del apéndice IV). En este EPU hay dos ordenadas máximas que reflejan el peligro sísmico dominadas por dos tipos de fuentes: profundidad intermedia, en $T=0.2$ seg y subducción, en el periodo $T=1$ seg.

El espectro de peligro uniforme es una herramienta bien conocida para obtener el espectro de diseño. El uso del espectro de diseño es una práctica común en ingeniería pero debido a su forma paramétrica algunas de las intensidades sísmicas son sobrestimadas para ciertos periodos estructurales respecto a las obtenidas del EPU (Fig. 3 del apéndice IV). Esto es por lo que se propone en este capítulo que los acelerogramas de diseño deben ajustar el EPU y no las intensidades del espectro de diseño. Sin embargo, se debe reconocer que con esto no se están considerando ciertas incertidumbres que tiene el espectro de diseño (*p.e.* incertidumbre en el periodo de la estructura). El periodo del retorno seleccionado es el usado para obtener el espectro de diseño para el código de diseño de la Ciudad de México (Ordaz *et al.* 2000). Por consiguiente, se asume que tal periodo de retorno da niveles de intensidades que proporcionarán un nivel aceptable de riesgo.

5.3.3 Desagregación probabilística del peligro sísmico

Se aplica un análisis de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation probabilistic seismic hazard assessment*, DPSHA) para identificar los escenarios sísmicos que contribuyen más significativamente en el peligro sísmico del sitio. Numerosos trabajos pueden ser útiles para obtener una DPSHA (Ishikawa y Kameda, 1988, 1991; McGuire, 1995; Chapman, 1995; Bazurro y Cornell, 1999; Alamilla *et al.* 2001b). Estos trabajos discuten cómo obtener la magnitud y distancia de la fuente sísmica para generar movimientos de diseño. Las propuestas usan una función de probabilidad condicional de la magnitud y la distancia para un nivel de intensidad en el modelo de PSHA. En este trabajo, se calcula la DPSHA mediante el uso de la técnica descrita en Chapman (1995) dada por la ec. (5.2),

$$U(m, r|y)_k = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot P(Y \geq y|m, r)_k \cdot f_M(m)_k \cdot f_R(r)_k \quad (5.2)$$

donde $U(\bullet)$ es considerada la función de densidad de probabilidad condicional conjunta de M y R para un valor de intensidad, y ; α_k es el número de sismos por unidad de tiempo con magnitud, m , entre los

valores de magnitud mínimo, M_o y máximo, M_u , respectivamente; $P(Y > y | m, r_{i,j})$ y $f_M(m)_k$ han sido previamente definidos; $f_R(r)_k$, es la función de densidad de probabilidad de las distancias.

Con ello, se obtienen las parejas de valores de magnitud y distancia que más frecuentemente ocurren (moda). Con estos valores es posible calcular movimientos de diseño sísmicos de acuerdo a un escenario sísmico realista.

Se obtuvieron las funciones de probabilidad condicional de la magnitud y la distancia para un periodo de retorno de 125 años, y para la aceleración máxima del suelo (*peak ground acceleration*, PGA) y los periodos estructurales de 0.2, 0.5, 1, 2 y 3 seg cuyas intensidades corresponden a 0.53, 1.33, 1.02, 1.27, 1.06 y 0.56 m/s², respectivamente. Estos periodos estructurales fueron seleccionados para ilustrar que periodos estructurales diferentes corresponden a escenarios sísmicos distintos dados en términos de magnitud y distancia. En la Figura 4 del apéndice IV se muestra la función de probabilidad condicional de la magnitud y distancia obtenidas del DPSHA; también se indica 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 FGE apropiada para representar la fuente sísmica de interés: *p.e.* 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 misma figura, se observa que tres funciones de probabilidad de peligro son bi-modales (PGA, T=0.2 y 0.5 seg), reflejando claramente las contribuciones de dos fuentes sísmicas y otras tres uni-modales (T=1, 2 y 3 seg). Se puede apreciar que para T=0.2 y 0.5 seg el peligro sísmico es dominado por sismos de profundidad intermedia (M 7.7, R 160 km) y para T=1, 2 y 3 seg por sismos de subducción (M 7.7, R 263 km). Pero hay claramente otros pares de valores modales para los distintos periodos estructurales que deben tenerse en cuenta para representar propiamente los más probables movimientos sísmicos, 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 esperan que sean diferentes.

5.3.4 Simulación de movimientos de suelo que ajusten al EPU

Se usan los pares de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos simulados en terreno firme (CU) usando el esquema propuesto en el capítulo 3 cuyas intensidades sísmicas (ordenadas espectrales) son asociadas a un periodo de retorno de 125 años.

Dos registros de CU de muy buena calidad donde se puede observar claramente la llegada de las ondas P y S (Fig. 5 del apéndice IV) se usaron como FGE para obtener los movimientos simulados: 21 de julio de 2000 (profundidad intermedia) y el del 25 de abril de 1989 (subducción). Para el uso de la FGE se requiere el conocimiento de algunos parámetros que caractericen los eventos grandes futuros que son a menudo desconocidos y con grandes incertidumbres que influyen de manera importante en las estimaciones de los movimientos sísmicos. Uno de los parámetros más importantes y menos estudiados es la caída de esfuerzo, $\Delta\sigma$. En el apéndice IV, se muestra qué caídas de esfuerzos fueron empleadas en este trabajo junto con una justificación de por qué se adoptaron los dos registros antes mencionados como FGE. Debido a la variabilidad de tiempos de ruptura (ver apéndice IV) en el modelo de la simulación usado, los movimientos simulados son obtenidos por aproximaciones sucesivas hasta que la ordenada sísmica requerida es alcanzada.

En la Figura 6 del apéndice IV se muestran los acelerogramas simulados con sus valores correspondientes de magnitud y distancia para la aceleración máxima del suelo (*peak ground acceleration*, PGA) y los periodos estructurales de $T=0.2$, 0.5 , 1 , 2 y 3 seg; estos movimientos presentan la apariencia de movimientos sísmicos reales y conservan las características de su fuente como es la amplitud y el contenido de frecuencia. Por ejemplo, los movimientos de profundidad intermedia presentan contenido de frecuencia más alto ($T=0.2$ y 0.5 seg) con respecto a los movimientos de subducción ($T=1$, 2 y 3 seg). En la Figura 6 del apéndice IV también se observa el movimiento sísmico de un sismo tipo local.

Como se explicará el PGA en la Ciudad de México es dominado por un sismo local. Para obtener este movimiento local, se escalo simplemente el PGA del evento del 12 de julio de 1974 ($M=3.5$, tipo local) para dar el nivel requerido de intensidad, debido a que existe poca información con respecto a la caída de esfuerzo y magnitud de este tipo de eventos. Es probable que un sismo local se origine en las antiguas fallas que se formaron en la cuenca; sin embargo, se ignora el origen exacto debido a que la magnitud pequeña de los sismos locales los hace difícil de estudiar. Sin embargo, el evento podría ser obtenido con la técnica de funciones de Green empíricas considerando que las caída de esfuerzo son iguales; sin embargo, nuevamente repito resulta muy incierto como determinar el momento sísmico para este tipo de evento; debido a que un sismo local puede no darse por un proceso sismológico como antes se menciono, sino también por algún derrumbe de alguna caverna subterránea, explosión entre otros. Por lo tanto, es necesario, en un futuro estudiar este tipo de eventos dado su importancia que tienen en el peligro sísmico del valle de México.

Los espectros de respuesta de los acelerogramas simulados fueron calculados y comparados con el EPU para un periodo de retorno de 125 años para ilustrar que cada uno cubre una sección del EPU. En la Figura 7 del apéndice IV se muestra este EPU (líneas gruesas) y los espectros de respuesta de aceleraciones (líneas delgadas) de los registros simulados mostrados en la Figura 6 del apéndice IV. Se puede observar que se estiman bien las ordenadas sísmicas que corresponden a cada uno de los periodos estructurales, pero ellos subestiman para otros periodos estructurales las intensidades sísmicas. Esto es porque tales ordenadas corresponden y deben ser cubiertas a través de 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 significativa para propósitos de diseño con la intención de mantener un nivel de peligro uniforme. Todos estos acelerogramas deben ser considerados para cubrir todas las fuentes sísmicas y movimientos sísmicos posibles.

Se propone encontrar los acelerogramas para ajustar el EPU. Se espera que las estructuras de periodo corto pudieran ser excitadas por un movimiento de profundidad intermedia o un evento local, y estructuras de periodo largo por un movimiento de subducción. En lo que sigue, se propone para cuales periodos estructurales las ordenadas espectrales deben ser calculadas asociadas a un EPU de 125 años. Los diferentes movimientos de diseño propuestos se explican a continuación, y la comparación de los espectros de respuesta se muestra en la Figura 7 del apéndice IV.

Acelerograma I: El primer movimiento sísmico debe ser un sismo local cuyo PGA este asociado al UHS (Fig. 7, del apéndice IV). Este movimiento sísmico no sólo debe usarse para estructura rígidas sino también para el análisis de terraplenes de tierra y laderas.

Acelerograma II: Como se mostró en Figura 3 del apéndice IV, hay un pico en $T 0.2$ seg causado por fuentes de profundidad intermedia (Fig. 7 del apéndice IV).

Acelerograma III: El tercer movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o de subducción cuya intensidad ajuste la intensidad del periodo estructural de T 0.5seg; esto es porque en este periodo, el peligro sísmico es dominado por ambas fuentes sísmicas. Para una estructura con periodo corto, un sismo de profundidad intermedia debe usarse, y para el caso de una estructura con periodo largo, un sismo de subducción debe seleccionarse.

Acelerograma IV, V y VI: Para periodos estructurales más grande que 1 seg, el peligro sísmico es dominado por fuentes de subducción. Por lo menos tres movimientos sísmicos deben seleccionarse para T=1 y 2 seg y, para estructuras de periodo grande (T>2 seg), otro acelerograma en T=3 seg.

Acelerograma VII: Este movimiento debe corresponder al periodo fundamental de la estructura a ser diseñada. Para el caso de una estructura con periodo corto, un sismo local o de profundidad intermedia debe usarse, y para el caso de una estructura con periodo largo, un sismo de subducción debe seleccionarse. Este acelerograma podrían ser obtenido simplemente modificando el paso de tiempo de uno de los registros anteriores.

5.4 Discusión

En este último capítulo, se presentó una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa el terreno firme del sur de la Ciudad de México, como un ejemplo para aplicar el método. Primero, las fuentes sísmicas principales que más afectan estructuras en el sitio es determinado mediante un análisis de peligro sísmico probabilístico. Segundo, aplicando un método de análisis de la desagregación del de peligro sísmico probabilístico (DPSHA), se encuentra la magnitud y distancia que más probabilidad presentan para generar una intensidad asociada a un periodo del retorno. Tercero, se utiliza un método para generar acelerogramas con propósitos de diseño, para el escenario sísmico determinado. Y, cuarto se sugiere para que periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse para ajustar el espectro de peligro uniforme (EPU).

Este último inciso 4º es importante, porque el método considera adecuado, que los acelerogramas propuestos se ajusten al EPU, y con ello se están considerando todas las posibles fuentes sísmicas que afectan al lugar. Dado que por definición, el EPU es el espectro cuyo valor de intensidad para cada una de las distintas frecuencias, incluye todas las posibles combinaciones de fuentes sísmicas que podrían afectar al sitio, y toma en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias, asociadas a un periodo de retorno dado; sin embargo, se reconoce que existen limitaciones que más adelante se señalan.

Con esta metodología, se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica en terreno firme de la Ciudad de México. Se obtuvo para este sitio que un mínimo de siete acelerogramas de diseño deben usarse para ajustar el EPU. Se indica para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse asociadas al EPU. Estos movimientos deben generarse para una ordenada espectral asociada a un periodo del retorno para los periodos siguientes: (I) el primero para un PGA, donde el movimiento debe ser de tipo local; (II) el segundo debe ajustar la intensidad en T 0.2 seg, esto corresponde a una fuente de profundidad intermedia; (III) este movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o subducción asociado a un periodo estructural de T 0.5 seg; (IV, V y VI) para T=1 ,2 y 3 seg, de una fuente de subducción; y (VII) para el periodo fundamental de la estructura a ser diseñada.

Los acelerogramas obtenidos, con esta metodología, fijando el espectro de peligro uniforme en un sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico constante, es decir, asociado a un periodo de retorno; estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos sísmicos de riesgo sísmico constante. Por lo que, para obtener estos, se requiere de otro tipo de análisis. Es necesario convertir el análisis de peligro sísmico a análisis de riesgo sísmico. Sería útil un estudio que determine escenarios sísmicos que estén asociados a un nivel de comportamiento estructural (p.e. la distorsión de entrepiso en edificios para dar un nivel de servicio o de colapso) para estructuras representativas o de interés en la región, es decir realizar un análisis probabilístico de la demanda sísmica. Estos métodos basados no solo en las ordenadas espectrales sino en la respuesta estructural no lineal deben ser cuidadosamente calibrados junto con observaciones. Por ejemplo, un análisis de Desagregación Probabilístico de la Demanda Sísmica, daría un escenario de demanda sísmica en términos de magnitud y distancia, para generar movimientos sísmicos representativos para proporcionar un cierto nivel de respuesta estructural. Estos movimientos se deben hacer disponibles a los ingenieros de la práctica. Teniendo en mente que no solo la estructura es importante sino también el contenido mismo que existe dentro de ellas. Por lo que, en un futuro cercano, se requerirá una revisión de las diferentes fuentes sísmicas para dar acelerogramas de diseño los cuales generan un cierto nivel intensidad asociado a un nivel de respuesta estructural.

CONCLUSIONES

Las conclusiones se presentan en la discusión de cada capítulo. Sin embargo, a continuación se incluye un resumen general de las principales conclusiones y contribuciones que se obtuvieron a lo largo de este trabajo.

Capítulo 1

En este trabajo se presentan dos leyes de atenuación para CU, SCT y CD de la Ciudad de México ante sismos de tipo subducción y falla normal. Las leyes de atenuación obtenidas para terreno firme pueden ser utilizadas para predecir espectros respuesta o leyes de atenuación en sitios instrumentados o no instrumentados de acuerdo a lo que se presentó en el capítulo 2.

Además se presentaron las diferencias en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en el valle de México ante dos tipos de eventos: subducción y falla normal. Se muestran diferencias importantes en los espectros de respuesta inelásticos, en la energía de entrada y en la energía histéresis normalizada de 1GDL en periodos cortos ($T < 1.0s$) sobre todo en terreno firme, teniendo mayor intensidad los sismos de falla normal con respecto a los de subducción en estos periodos ante movimientos sísmicos con una misma aceleración máxima del suelo.

Se estudiaron eventos sísmicos registrados en edificios instrumentados tanto en terreno firme como en zona de lago de la ciudad de México. Se encuentra que los modos superiores pueden tener una gran influencia cuando los sismos son de falla normal. Estos modos superiores provocan una mayor intensidad en periodos bajos que afectan a los contenidos en las estructuras y podrían causar daños en pisos superiores.

Las amplificaciones en los pisos superiores con respecto al suelo varían entre 2 y 6, siendo mayores las amplificaciones en estructuras con $T < 1s$ debido a los sismos de falla normal y para estructuras con $T > 1s$ debido a sismos de subducción tanto en terreno firme como en zona de lago. También, es importante considerar el tipo de estructuración del edificio ya que dependiendo de esta la respuesta sísmica cambia de un tipo de sismo a otro; ante sismos de falla normal en periodos mayores de un segundo, las amplificaciones en la azotea son ligeramente mayores para estructuras con deformación a flexión ($\alpha=4$) como son estructuras con muros de concreto con respecto a estructuras que presentan deformación a cortante ($\alpha=10$) como marcos estructurales.

Por lo tanto, el riesgo sísmico de estructuras en sitios del valle de México está prácticamente dominado por los eventos de subducción, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en este trabajo se puede esperar que los sismos de falla normal causen daños en estructuras con periodos estructurales $T < 1.0s$ en terreno firme y en zona de lago en periodos alrededor del segundo modo fundamental del suelo.

También se puede esperar mayores distorsiones en pisos superiores y daños en contenidos de edificios en los diferentes niveles del edificio debido a este tipo de sismos de falla normal, tanto en edificios que tengan periodos estructurales antes mencionados como en periodos mayores a estos debido a los modos superiores. Para fines prácticos, esto es muy importante al utilizar acelerogramas de diseño en la evaluación de la respuesta estructural debido a que no solo se debe contemplar el uso de grandes sismos de subducción sino también considerar los efectos que tienen los sismos de falla normal en la respuesta estructural.

Capítulo 2

Se presentaron cuatro métodos diferentes para obtener espectros de respuesta futuros dados la magnitud y la distancia al área de ruptura basados en datos acelerométricos. Estos métodos han sido usados en varias aplicaciones, por ejemplo, en el cálculo de los espectros de diseño incluidos en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal que consideran el peligro sísmico en varios sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender y calcular sus errores y las incertidumbres son muy importantes para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados en el capítulo 2, el Método 1, la regresión de Bayesiana directa de espectros de respuesta, es la mejor opción desde que ha mostrado los errores y desviaciones más pequeños. El problema con el Método 1 es que necesita un conjunto amplio de registros (espectros de respuesta) para ser confiable, y éste no es el caso para la mayoría de los sitios. Realmente, es sólo cierto para los sitios presentados en este trabajo (CU, SCT y CD); para cualquier otro sitio el Método 1 no puede aplicarse.

El Método 2 se basa en los espectros de amplitudes de Fourier y el uso de la teoría de vibración aleatorias junto con la duración del movimiento fuerte, un paso que introduce aproximaciones que pueden reducir su confiabilidad. Las desviaciones estándar calculadas para este método son normalmente las más grandes.

Para sitios ubicados en la zona de lago de la Ciudad de México, la falta de datos para la mayoría de los lugares hace que los Métodos 1 y 2 sean casi inútiles. Esto es por lo que los Métodos 3 y 4, los cuales cuentan con datos observados en la estación de referencia (CU), necesitan ser empleados. El Método 3 que está basado en los espectros de respuesta en CU y el uso de cocientes espectrales de respuesta es mejor que el Método 4 donde el uso de la teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento de suelo fuerte introducen incertidumbres y errores. Por supuesto, esto es considerando que el comportamiento no lineal no ocurre en el suelo de la Ciudad de México que todavía será confirmado por registros futuros.

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación viene a discusión, especialmente en un lugar como la Ciudad de México con una zona de lago que cambia sus características de respuesta dentro de unas docenas de metros. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de peligro o riesgo, o cualquier estudio individual del espectro de respuesta del sitio específico. De los resultados presentados en este trabajo está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

También, se enuncia un método alternativo para la obtención de leyes de atenuación en sitios no instrumentados. Para ello, es necesario contar, solamente, con una ley de atenuación del espectro de respuesta en roca o terreno firme (sitio de referencia) y conocer las propiedades geotécnicas del sitio requerido. Por lo que, en un futuro cercano, este método resultará atractivo, en la práctica, para muchos sitios en donde no se cuenta con registros y se desea realizar un análisis probabilístico del peligro sísmico.

Capítulo 3

En este capítulo, se presentó una expresión para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación. Los cuatro factores son: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento en alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fases de la señal. Son comparadas las intensidades calculadas mediante el método de simulación con sismos registrados en México de tipo subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). Se muestra que el esquema planteado, proporciona una adecuada aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente o distancias comparables a las dimensiones de la fuentes, el método pierde precisión debido a los patrones de radiación y heterogeneidades de la fuente, para estos casos otras alternativas deben ser usadas. Posiblemente el método presentado podría considerar los patrones de radiación considerando un modelo que considere el tamaño de la fuente (*p.e.* Método de Hirikura *et al.* 1993). Esto significa, que la función de Green empírica se debe modificar por atenuación para cada celda; y aplicar la técnica de simulación, entonces la señal generada tomaría en cuenta en forma directa los efectos mencionados.

Cabe señalar, que las estimaciones del movimiento del suelo, usando el esquema de simulación propuesto no son libres de incertidumbres. Estas incertidumbres, como es bien conocido, son uno de los factores claves para la estimación del peligro sísmico probabilístico. Dentro del esquema de simulación, se asumió que la atenuación con la distancia es determinística, así como los efectos de sitio, porque estos están implícitamente en el registro usado como función de Green. Sin embargo, la incertidumbre debido a la fuente, debe ser investigada para cuantificar la variabilidad de los parámetros del movimiento del suelo de una simulación a otra, para una caída de esfuerzos dada. Esta cuantificación de la incertidumbre, aún si fuera parcial, podría dar pistas para conocer que porción de la variabilidad podría ser atribuido a detalles del proceso de ruptura.

Capítulo 4

Se presentaron cinco métodos para obtener historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Estos métodos han sido usados para evaluar el comportamiento de estructuras, y en el análisis de riesgo sísmico. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender su aplicación y limitaciones es muy importante para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, escalando acelerogramas existentes de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad, presenta una buena aproximación con respecto a el evento objetivo en amplitud; sin embargo, no toma en cuenta el cambio respectivo en el contenido de

frecuencia y duración en las historias de aceleración. Esto es importante cuando se desea conocer el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis. Por otro lado, un sismo de pequeña magnitud tiene una forma espectral diferente a la de un sismo con mayor magnitud; el escalamiento, que se da de manera física, resulta muy diferente. La región sísmica también influye de manera importante en el escalamiento del movimiento sísmico. Cuando, se usan registros provenientes de la misma región sísmica, los resultados son aceptables y es posible obtener intensidades similares a un evento ocurrido en la región. Por otro lado, si se usa un movimiento registrado de una región diferente a uno requerido. Por lo tanto, no es aconsejable usar registros para escalar de otra fuente sísmica que no sea una deseada. Otro problema con el Método 1 es que necesita un registro confiable, y no es el caso para muchos sitios.

El Método 2 usa un procedimiento que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a la correspondiente amplitud del espectro de respuesta de aceleraciones objetivo. Este método usa la teoría de vibraciones aleatorias, junto con una duración del movimiento fuerte, pasos que introducen aproximaciones que reducen su confiabilidad. Aunado a que el Método 2 asume un proceso estacionario, éste genera una señal que no tiene la apariencia de un sismo real. Además, de acuerdo a lo señalado por Naiem y Lew (1995) se sobreestiman las demandas de desplazamiento y la energía de entrada al sujetar una estructura a estos movimientos.

En el Método 3, las intensidades espectrales son semejantes a las observadas; pero al obtener los eventos simulados este método no es capaz de representar señales semejantes a la señal objetivo, debido a las restricciones impuestas en la función moduladora de amplitud y frecuencia.

El Método 4 es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo en sitios en los cuales registros de movimientos no son disponibles. Las características esenciales es que toman en cuenta varios factores que afectan al movimiento del suelo (fuente, dirección y sitio) dentro de formas funcionales simples. Por lo tanto, el Método 4 debe ser usado cuando los registros de movimientos no están disponibles. Pero, si existen registros en el lugar, otros métodos se deben usar.

De los resultados presentados en este trabajo, es claro que usar el Método 5 para casi cualquier sitio instrumentado (excepto cerca de la fuente) es la mejor manera para obtener historias de aceleración en un sitio instrumentado. Para sitios no instrumentados, es posible aplicar el Método 5, con ayuda del Método 3 o del Método 4. Con alguno de estos dos métodos se generan movimientos sísmicos, que se consideran como la “semilla”, es decir, la función de Green; a la cual se le aplica la técnica de simulación de funciones de Green y con ello, posteriormente, se obtiene una señal simulada (Kamae *et al.* 1991; Aguirre, 2005).

Capítulo 5

En este capítulo, se presentó una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa el terreno firme del sur de la Ciudad de México, como un ejemplo para aplicar el método. La metodología consistió en: 1) Determinar las fuentes sísmicas principales que más afectan estructuras en el sitio a través de realizar un análisis de peligro sísmico probabilístico, 2) Aplicar un método de análisis de la desagregación del peligro sísmico probabilístico (las siglas en inglés DPSHA) con lo que se encuentra la magnitud y distancia que más probabilidad presentan para generar una intensidad asociada a un periodo del retorno, 3) Utilizar un método para generar

acelerogramas con propósitos de diseño, para el escenario sísmico determinado (ver apéndice III) y 4) Establecer y proponer para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse para ajustar el Espectro de Peligro Uniforme (EPU).

Este último inciso 4 es importante, porque el método considera adecuado, que los acelerogramas propuestos se ajusten al EPU, y con ello se están considerando todas las posibles fuentes sísmicas que afectan al lugar. Dado que por definición, el EPU es el espectro cuyo valor de intensidad para cada una de las distintas frecuencias, incluye todas las posibles combinaciones de fuentes sísmicas que podrían afectar al sitio, y toma en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias, asociadas a un periodo de retorno dado; sin embargo, se reconoce que existen limitaciones que más adelante se señalan.

Con esta metodología, se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica en terreno firme de la Ciudad de México. Se obtuvo para este sitio que un mínimo de siete acelerogramas de diseño deben usarse para ajustar el EPU. Se indica para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse asociadas al EPU. Estos movimientos deben generarse para una ordenada espectral asociada a un periodo del retorno para los periodos siguientes: (I) el primero para un PGA, donde el movimiento debe ser de tipo local; (II) el segundo debe ajustar la intensidad en T 0.2 seg, esto corresponde a una fuente de profundidad intermedia; (III) este movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o subducción asociado a un periodo estructural de T 0.5 seg; (IV, V y VI) para T=1 ,2 y 3 seg, de una fuente de subducción; y (VII) para el periodo fundamental de la estructura a ser diseñada.

Los acelerogramas obtenidos, con esta metodología, fijando el espectro de peligro uniforme en un sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico constante, es decir, asociado a un periodo de retorno; estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos sísmicos de riesgo sísmico constante. Por lo que, para obtener estos, se requiere de otro tipo de análisis. Es necesario convertir el análisis de peligro sísmico a análisis de riesgo sísmico. Sería útil un estudio que determine escenarios sísmicos que estén asociados a un nivel de comportamiento estructural (*p.e.* la distorsión de entrepiso en edificios para dar un nivel de servicio o de colapso) para estructuras representativas o de interés en la región, es decir realizar un análisis probabilístico de la demanda sísmica. Estos métodos basados no solo en las ordenadas espectrales sino en la respuesta estructural no lineal deben ser cuidadosamente calibrados junto con observaciones. Por ejemplo, un análisis de Desagregación Probabilístico de la Demanda Sísmica, daría un escenario de demanda sísmica en términos de magnitud y distancia, para generar movimientos sísmicos representativos para proporcionar un cierto nivel de respuesta estructural. Estos movimientos se deben hacer disponibles a los ingenieros de la práctica. Teniendo en mente que no solo la estructura es importante sino también el contenido mismo que existe dentro de ellas. Por lo que, en un futuro cercano, se requerirá una revisión de las diferentes fuentes sísmicas para dar acelerogramas de diseño los cuales generan un cierto nivel intensidad asociado a un nivel de respuesta estructural.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N.A. y Silva, W.J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seism. Res. Let.*, **68**, 94-127.
- Aguirre, J. (2005). Escenarios sísmicos a través de la caracterización de las fuentes sísmicas en México, *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Alamilla, J., Esteva, L., García P. J. y Díaz L., O. (2001a). Evolutionary properties of stochastic models of earthquakes accelerograms: Their dependence on magnitude and distance, *Journal of Seismology*, **5**, 1-21.
- Alamilla, J., Esteva, L., García P. J. y Díaz L., O. (2001b). Simulating earthquake ground motion at a site, for given intensity and uncertain source location, *Journal of Seismology*, **5**, 475-485.
- Atkinson, G. M. (2006). Single-Station Sigma, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 446-455.
- Baker, J.W., Cornell, C.A., y Tothong, P. (2005). Disaggregation of seismic drift hazard. *Proceedings, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR05)*, Rome, Italy.
- Bazzurro P. y Cornell C. (1999). Disaggregation of seismic hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 501-520.
- Boatwright, J. (1988). The seismic radiation from composite models of faultings, *Bull. Seism. Soc. Am.* **78**, 489-508.
- Bommer, J.J., Scout S.G. y Sarma S. K. (1998). Time-history representation of seismic hazard," *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.
- Bommer, J.J., Scott S.G. y Sarma S.K. (2000). Hazard-consistent earthquake scenarios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 219-231.
- Boore, D. G. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- Boore, D. G. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method, *Pure and Applied Geophysics.*, **160**, 635-676.
- Bour, M. y Cara M. (1997). Test of a simple empirical Green's function method on moderate-sized earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**, 668-683.

- Cartwright, D. y Longuet-Higgins, M. (1956). The statistical distribution of the maxima of a random function. *Proceedings of the Royal Society of London*, **A 237**, 212-232
- Chapman, M. (1995). A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 937-942.
- Chan, S., Ruiz S. y Montiel, M. (2005). Escalamiento de acelerogramas y mínimo número de registros requeridos para el análisis de estructuras, *Revista de Ingeniería Sísmica*, **7**, 1-24.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk análisis, *Bull. Seism. Soc. Ame.*, **58**, 1583-1606.
- Esteva, L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería, *Series del Instituto de Ingeniería*; 246.
- Furumura, T. y Singh. S.K. (2002). Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes: The attenuation functions for interplate and inslab events, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**, 2210-2125.
- García, D. Singh S.K., Herráiz M., Pacheco J.F. y Ordaz M. (2004). Inslab earthquakes of Central Mexico: Q, source spectra and stress Drop, *Bull. Seism. Soc. Am.* **94**, 3.
- Hartzell, S. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1-4.
- Hartzell, S., Harmsen, S., Frankel A. y Larsen S. (1999). Calculation of broadband time histories of ground motion; comparison of methods and validation using ground motion from the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**, 1484-1504.
- Hartzell, S., Guatteri, M., Mai M. M., Liu P. C. y Fisk M. (2005). Calculation of broadband time histories of ground motion, part II: kinematic and dynamic modeling using theoretical Green's function and comparison with the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 614-645.
- Heuze, F., Ueng, T., Hutchings L., Jarpe P. y Kasameyer (1997). A coupled seismic-geotechnical approach to site-specific strong motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **16**, 259-272.
- Hutchings, L. (1991). Prediction of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **81**, 1813-1837.
- Hutchings, L. (1994a). Kinematic earthquake models and synthesized ground motion using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1028-1050
- Hutchings, L. (1994b). Earthquake models and synthesized ground motion for the 1971 San Fernando earthquake and aftershocks using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1028-1050.
- Hutchings, L., Jarpe, S.P., Kasameyer, P.W. y Foxall W. (1996). Synthetic strong ground motions for engineering design utilizing empirical Green's functions, *Eleven World conference of earthquake Engineering, Acapulco*, June 23-28.

-
- Ishikawa, Y. y Kameda, H. (1988). Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, **II**, 89-94.
- Ishikawa, Y. y Kameda, H. (1991). Probabilty-based determination of specific scenario earthquake. *Proceedings of Four International Conference of Seismic Zonation*, **II**, 3-10.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of ground motion during large earthquakes, *Bull. Disaster. Prevention. Inst.*, Kyoto Univ. **33**, 63-104.
- Jarpe, S. P. y Kasameyer, P. W. (1996). Validation of procedure for calculating broadband strong-motion time histories with empirical Green's functions, *Bull Seism. Soc. Am.* **86**, 1116-1129.
- Jaimes, M. A. y Reinoso, E. (2006a). Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y falla normal. Aceptado para su publicación en la *Revista de Ingeniería Sísmica*
- Jaimes, M.A., Reinoso E., y Ordaz M. (2006b). Empirical Green's functions modified by attenuation for sources located at intermediate and far distances from the original source. Aceptado para su publicación en el *Journal of Earthquake Engineering*.
- Jaimes, M.A., Reinoso E., y Ordaz M. (2006c). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, Aceptado para su publicación en el *Journal of Earthquake Engineering*.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1986). On simulation large earthquakes by Green's functions addition of smaller earthquakes, in *Earthquake Source Mechanics*, (Maurice Ewing series 6), s. Das, J. Boatwright and C. H. Sholtz (Editors), American Geophysical Monograph 37, Washington, D.C., 269-274.
- Joyner, W. y Boore, D. (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data", *Bull. Seism. Soc. Am.* **83**, 469-487.
- Kanamori, H., Jennings, P.C., Singh S.K. y L. Astiz (1993). Estimation of strong ground motions in Mexico City expected for large earthquakes in the Guerrero seismic gap. *Bull. Seism. Soc. Am.* **83**, 811-829.
- Kamae, K., Irikura K. y Fukuchi Y. (1991). Prediction of strong ground motion using a semi-empirical technique. *11th SMIRT*, Tokyo, 45-50.
- Kamae K., Irikura K. y Pitarka A. (1998). A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 357-367.
- McGuire. (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bull. Seism. Soc. Ame.*, **85**, 1275-1284.
- Miranda, E. y Taghavi, S. (2005). Approximate floor acceleration demands in multi-story buildings. I: *Formulation. Journal of Structural Engineering, ASCE*, **131**, No.2, 203-211.

- Montalvo-Arrieta, Reinoso, E., J. C., Sánchez-Sesma, F., Singh S.K., Pacheco, J. y Ordaz M. (2002). The seismic response of the hill zone in Mexico City: A review and new findings. Enviado para su revision y publicación en el *Bull. Seism. Soc. Ame.*
- Naeim F. y Lew M. (1995). On the use of the design spectrum compatible time histories. *Earthquake Spectra*; **11**, 111-127.
- Nojima, N. y Kameda, H. (1988). Simulation of risk-consistent earthquake motion. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, **II**, 95-100.
- Nozu, A. and Morikawa, H. (2004). Assessment of soil nonlinearity using empirical Green's function method, *13th World Conf. on Earth. Eng.* Vancouver, Canada, 1-6.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S.K. (1995). A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 1635-1647.
- Ordaz M, Miranda, E. y Avilés J. (2000). Propuesta de espectros de diseño para el DF. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Pavón R. V. y Rodríguez N. C. (1990). Instrumentación sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural, *Seminario Internacional, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.*
- Papageorgiou, A.S. y Aki, K. (1983). A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion I. Description of the model. *Bull. Seism. Soc. Am.* **73**, 693-722.
- Pérez, A., Jaimes, M.A. y Ordaz, M. (2007). Spectral attenuation relations at soft sites based on existing attenuation relations for rock sites Enviado para su publicación al *Journal of Earthquake Engineering.*
- Reyes, C. (1999). El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios. *Tesis de doctorado*, UNAM, México
- Reinoso, E., Pérez-Rocha, L., Ordaz, M. y Arciniega, A. (1992). Prediction of response spectra at any site in Mexico City. *Proceedings of the Tenth World Conference of Earthquake Engineering*, 767-772.
- Reinoso, E. y Ordaz, M. (1999). Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings. *Earthquake Spectra*, **15**, 273-295.
- Rosenblueth, E. y Arciniega, A. (1992). Response spectral ratios. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**, 483-492.
- Sadigh, K. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Let.*, 68, 1, 180-189.

-
- Singh, S. K., Mena, E., y Castro, R. (1988). Some aspects of source characteristics and the ground motions amplifications and near Mexico City from the acceleration data of the September, 1985, Michoacán, Mexico earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 451-477.
- Singh S. K. (2003). Advances in seismology with impact on earthquake engineering. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Conferencia Magistral, León, Gto.
- Somerville, P., Smith, N. y Graves R. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seism. Res. Letters*, **68**, 199-222.
- Shome N., Cornell, C.A., Bazzurro, P. y Carballo, J.E. (1998). Earthquakes, records and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, 14, 3, 469-500.
- Shome, N. and Cornell, C.A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of non-linear structures. *Report No. RMS-35*, RMS Program Stanford University, Stanford
- Tumarkin, A.G., Archuleta, R.J. y Madariaga, R. (1994). Scaling relations for composite earthquake models. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1279-1283.
- Wennerberg, L. (1990). Stochastic summation of empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 1418-1432.
- Zeng, Y., Anderson, J. G. y Yu, G. (1994). A composite source model for computing realistic synthetic ground motions, *Geophys. Res. Lett.* **21-8**, 725-728.

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS EN EL VALLE DE MÉXICO ANTE SISMOS DE SUBDUCCIÓN Y DE FALLA NORMAL

Miguel Angel Jaimes Téllez y Eduardo Reinoso Angulo ⁽¹⁾

RESUMEN

Se realiza un estudio comparativo del comportamiento que presentan algunas estructuras desplantadas en distintos sitios del valle de México mediante la aplicación de un modelo simplificado (Miranda y Taghavi, 2005) ante eventos sísmicos simulados y registrados de subducción y falla normal. Se usa el método de simulación de funciones de Green empíricas (Ordaz y otros, 1995) y los sismos utilizados son los del 25 de abril de 1989 y del 21 de julio de 2000. Se analiza el comportamiento elástico estructural considerando dos tipos de deformación lateral: como viga de flexión y como viga de cortante, y se comparan los resultados en términos de los espectros de respuesta inelásticos, de la energía de entrada y de la energía histéretica normalizada de un sistema de un grado de libertad (1GDL). Los resultados muestran que un sismo de falla normal, debido al mayor contenido de alta frecuencia, provoca que los modos superiores de la estructura tengan mayor participación, lo que origina mayores intensidades en estructuras de periodo corto. Esto podría provocar mayores daños tanto en el edificio como en sus contenidos con respecto a un sismo de tipo subducción. Para fines prácticos, se recomienda utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de falla normal y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar.

ABSTRACT

A comparative study of the behavior of structures located at different sites in the valley of Mexico is shown using a simplified structural model (Miranda and Taghavi, 2005) and simulated strong ground motions for subduction and intermediate depth earthquakes. The strong ground motion simulation has been carried out using the empirical Green's functions method (Ordaz *et al*, 1995). The elastic behavior is analyzed considering two types of structural deformation: flexural beam and shear beam. The comparison is done using inelastic, input energy and normalized hysteretic energy spectra. Results show that the high frequency content of an intermediate depth earthquake yields a greater contribution from higher modes to the response and large intensities for short period structures. This could cause not only damage to the structure but also to its contents. From the earthquake resistant design point of view it is necessary to use design accelerograms from both subduction and intermediate depth earthquakes, in order to be able to evaluate the structural response and the damage that both types of strong ground motions could cause.

Artículo recibido el 16 de agosto de 2005 y aprobado para su publicación el 7 de marzo de 2006. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

(1) Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510 México, DF. migueljaimes@hotmail.com, ere@pumas.iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

Los sismos de subducción son los eventos sísmicos más estudiados en México por su frecuencia y magnitud y por la gran probabilidad de que pueda ocurrir en un futuro no lejano un evento sísmico que podría superar lo ocurrido en 1985. Sin embargo, a lo largo de la historia se han presentado algunos eventos al interior del país que liberan energía no por interacción entre las placas tectónicas como ocurre en los sismos de subducción sino asociados a un mecanismo de falla normal. Estos, en algunas ocasiones, han provocado no solamente daños estructurales y económicos, sino también la pérdida de vidas humanas; ejemplo de ello son los sismos de Orizaba, Veracruz ($M_w=7.0$) en 1973, el de Huajuapán de León ($M_w=7.0$) en 1980 y más recientemente los del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.5$), 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$) también en el mismo municipio de Huajuapán de León, 30 de septiembre de 1999 ($M_w=7.5$) en Oaxaca y 21 de julio de 2000 ($M_w=5.9$) en Puebla.

Existen evidencias históricas y avances recientes que muestran las diferencias entre estos dos tipos de sismos. Estudios detallados de la fuente indican que el tipo de falla, caída de esfuerzos y magnitud provocan que los sismos de falla normal sean más energéticos que los sismos de subducción. Además, la propagación de las ondas de los sismos de subducción difiere de los sismos de falla normal (Furumura y Singh, 2002), donde la atenuación de los sismos de falla normal es mayor que la de los eventos de subducción (Singh, 2003). Como resultado de estas diferencias, el movimiento en la ciudad de México es muy distinto ante ambos eventos, reflejándose esto no sólo en el contenido de frecuencias donde los sismos de falla normal presentan un mayor contenido de alta frecuencia con respecto a los de subducción, sino también en la duración ya que los sismos de subducción son más largos que los sismos de falla normal. Ante estas diferencias se puede esperar que los efectos que provocan los movimientos de subducción y falla normal en las estructuras sean diferentes.

Por otro lado, debido a la gran cantidad de factores que hay que tomar en cuenta en la evaluación de la respuesta de cualquier estructura en sus diferentes pisos es conveniente contar con herramientas prácticas para estimar las fuerzas impuestas por eventos sísmicos. Esto es porque en algunos casos no resulta práctico elaborar modelos detallados de una estructura para realizar una estimación rápida de las demandas de intensidad como la aceleración pico de piso, historias de tiempo de aceleración y espectros de piso para un movimiento sísmico dado. En este trabajo se utiliza el modelo simplificado de Miranda y Taghavi (2005) para analizar el comportamiento elástico de estructuras ya que se ha mostrado (Miranda y Taghavi, 2005; Taghavi y Miranda, 2005; Reinoso y Miranda, 2005) que el método da buenos resultados aun comparado con modelos muy elaborados de elementos finitos.

Para este estudio se seleccionan dos sitios de la ciudad de México (Ciudad Universitaria, CU, y Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, ubicados en terreno firme y blando, respectivamente) y se consideran las dos fuentes sísmicas que más afectan a estos sitios (Guerrero y Profundidad Intermedia Centro donde se originan eventos de tipo subducción y falla normal, respectivamente). Mediante la aplicación de un método que considera la desagregación del peligro sísmico (Ishikawa y Kameda, 1988) es posible obtener los valores esperados de

magnitud, M , y distancia, R , para generar una intensidad sísmica como la aceleración máxima del suelo o la aceleración espectral (en este trabajo, la aceleración máxima del suelo, $A_{S_{MAX}}$) asociada a un periodo de retorno, TR , de las fuentes sísmicas estudiadas (Jaimés y otros, 2004). Esta técnica permite identificar los escenarios en términos de magnitud y distancia de la fuente al sitio que tienen una contribución significativa en el peligro sísmico para una tasa de excedencia dada. Se aplica con la finalidad de mostrar las diferencias de comportamiento que presentaría la estructura ante ambos eventos teniendo estos la misma intensidad sísmica en el sitio de interés.

El objetivo de este trabajo es estudiar las diferencias de comportamiento de estructuras desplantadas en el valle de México ante eventos sísmicos de subducción y falla normal. Estas diferencias se estudian mediante la aplicación de un método simplificado para estudiar el comportamiento elástico y la amplificación que tiene la estructura en distintos pisos con respecto a la aceleración máxima del suelo considerando ambos tipos de deformación lateral: como viga de flexión y como viga de cortante. También, para sistemas de un grado de libertad (1GDL) se comparan los espectros de respuesta inelásticos, de energía de entrada y de energía de histéresis. Por último, la respuesta elástica ante eventos de tipo subducción y de falla normal se compara con tres edificios instrumentados en la ciudad de México: dos en zona de lago y uno en terreno firme. Estos han estado sometidos a eventos sísmicos moderados que no han causado daños a las estructuras, es decir, que las estructuras mantienen un comportamiento elástico, por lo que es posible aplicar el método propuesto.

FUENTES SÍSMICAS, SITIOS Y ACELEROGRAMAS SIMULADOS

En la figura 1 se muestran los límites y ubicación de las dos fuentes sísmicas idealizadas como polígonos (Nishenko y Singh, 1987) en las que se lleva a cabo un proceso de acumulación y liberación de energía independiente del que ocurre en otras fuentes sísmicas, incluidas en este estudio y que afectan a la Ciudad de México: Guerrero (sombreado oscuro) y Profundidad Intermedia Centro (sombreado tenue). Se muestra también la ubicación de los dos epicentros que corresponden a los escenarios obtenidos (círculos) por medio de la técnica de desagregación del peligro sísmico (DPS) que presentan mayor probabilidad de generar una aceleración máxima del suelo, $A_{S_{MAX}}$, asociada a un periodo de retorno de 125 años. El periodo de retorno es el usado para calcular el espectro de diseño para el reglamento de construcciones de la Ciudad de México (Ordaz y otros, 2000). Por lo tanto, asumimos que tal periodo de retorno da niveles de intensidad que proporcionarán un nivel aceptable de riesgo. Para CU, la aceleración resultante para el periodo de retorno mencionado es de $A_{S_{MAX}}=0.72\text{m/s}^2$ y para SCT es de $A_{S_{MAX}}=1.78\text{m/s}^2$. Mediante la aplicación de la DPS se obtuvo para CU los valores esperados de $M=8.1$ y $R=256$ km debido a la fuente de Guerrero y $M=7.7$ y $R=112$ km debido a la fuente de Profundidad Intermedia Centro y para el sitio SCT se obtuvo una $M=7.9$ y $R=262$ km debido a la fuente de Guerrero y $M=7.6$ y $R=123$ km para la fuente de Profundidad Intermedia Centro. Para generar los acelerogramas simulados en CU y SCT para los escenarios sísmicos determinados en términos de los valores esperados de la magnitud y distancia antes mencionada, se seleccionaron los registros obtenidos de los eventos 25/abril/1989 (subducción) y 21/julio/00 (falla normal). En la figura 1 también se muestra la ubicación de algunos eventos de subducción (cuadrados) y de falla normal (triángulos) ocurridos entre 1994 y 2000, y que fueron registrados en edificios instrumentados

que se utilizarán más adelante en este estudio. La tabla 1 contiene los datos necesarios para realizar las simulaciones: ubicación, magnitud, momento sísmico y caída de esfuerzos.

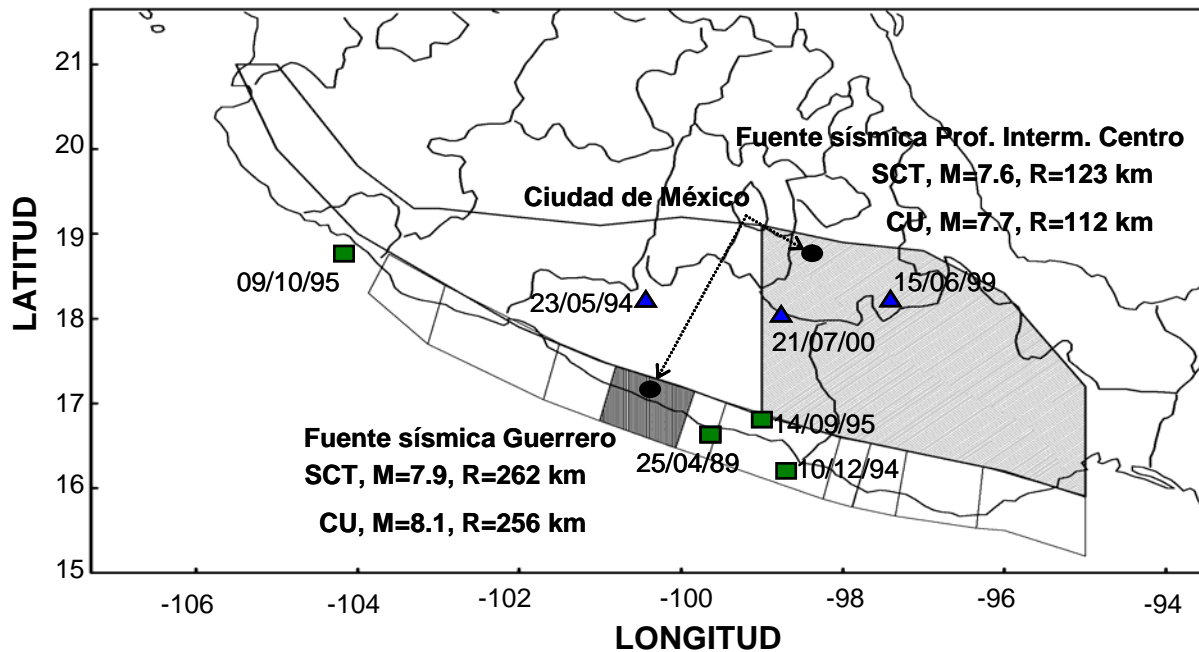


Figura 1. Localización de los eventos de subducción (rectángulos) y de falla normal (triángulos) utilizados en este estudio. También se indican los epicentros (círculos) y los valores esperados de M y R de las fuentes sísmicas de Guerrero (sombreado oscuro) y Profundidad Intermedia Centro (sombreado tenue) para generar eventos simulados en CU y SCT cuya aceleración máxima del suelo corresponde a un periodo de retorno de 125 años

Tabla 1. Datos de los sismos utilizados como funciones de Green empíricas

Evento	Sismo	M_s	Epicentro		Prof. km	Tipo	M_{os} (dina-cm)	$\Delta\sigma_s$ (bar)
			Lat	Long				
			(°S)	(°W)				
1	25/04/89	6.9	16.58	99.48	17	SUB	¹ 2.4×10^{26}	¹ 150
2	21/07/00	5.9	18.09	98.97	16	FN	² 6.0×10^{24}	² 360

¹Ordaz y otros (1995), ²Iglesias y otros (2002)

En la figura 2 se presentan los acelerogramas simulados obtenidos por medio del método de la función de Green empírica (FGE) con los valores esperados de magnitud y distancia para los sitios CU (lado izquierdo) y SCT (lado derecho) debido a las dos fuentes sísmicas estudiadas. En CU, se observa que para generar un sismo en la zona de Guerrero cuya A_{sMAX} sea $0.72m/s^2$ el valor de la duración resultante es de $D \approx 80s$ y para zona de Profundidad Intermedia Centro de $D \approx 60s$, es decir, que la duración en sismos de subducción resulta mayor que para los de falla normal; también se puede apreciar un mayor contenido de frecuencias bajas en el sismo de

subducción con respecto al de falla normal. Para SCT (lado derecho) también resultan evidentes las diferencias de movimientos ante una misma intensidad, $A_{S_{MAX}} = 1.78 \text{ m/s}^2$, que generan las dos fuentes sísmicas en este sitio ($D \approx 160\text{s}$, Guerrero y $D \approx 80\text{s}$, Profundidad Intermedia Centro). Claramente, los efectos de estos dos grupos de simulaciones en cualquier estructura serían diferentes aún cuando tienen la misma intensidad en términos de la aceleración máxima del suelo, $A_{S_{MAX}}$.

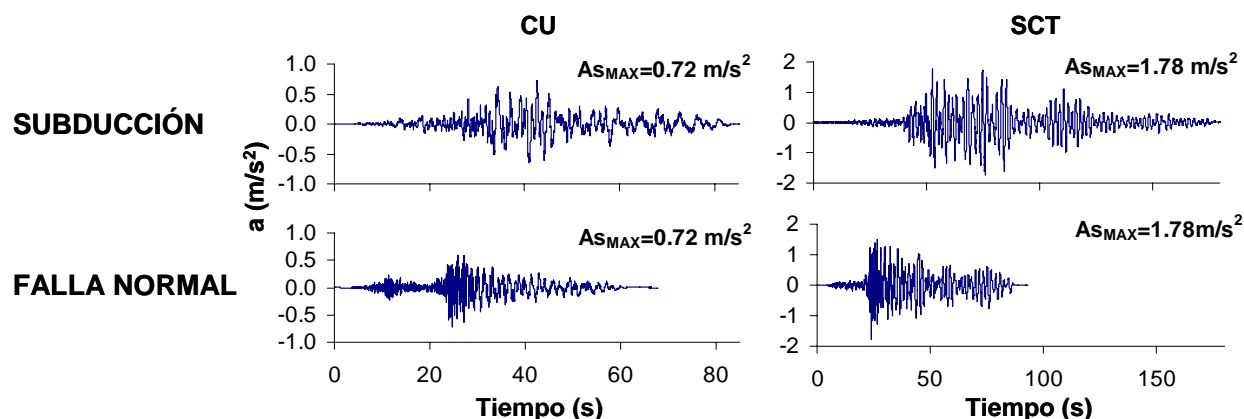


Figura 2. Acelerogramas simulados cuya aceleración máxima del suelo, $A_{S_{MAX}}$, corresponde a un periodo de retorno de 125 años debidos a sismos de subducción (parte superior) y falla normal (parte inferior) en CU y SCT

MODELO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Miranda y Taghavi (2005) desarrollaron un modelo para el cálculo de la respuesta estructural bajo comportamiento elástico lineal empleando un modelo continuo que consiste en una viga vertical en voladizo que combina deformaciones laterales de flexión y cortante cuando está sujeta a movimientos sísmicos horizontales en su base. El método combina la aplicación de un análisis modal utilizando, en nuestro caso, los seis primeros modos de vibrar con un modelo simplificado de la estructura a partir del cual se estiman formas modales, factores de participación y relación de frecuencias modales. El modelo está dado por la ecuación 1,

$$\frac{\rho}{EI_o} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

donde H es la altura total del edificio, ρ es la masa por unidad de longitud y α es un parámetro adimensional. Este último parámetro está dado por la ecuación 2,

$$\alpha^2 = H^2 \frac{GA_o}{EI_o} \quad (2)$$

donde EI_o y GA_o son la rigidez lateral en la viga de flexión y cortante, respectivamente.

Si se considera que ρ y la distribución de rigidez en altura son uniformes las aceleraciones en cada nivel para una estructura con comportamiento elástico se pueden obtener como la superposición de la respuesta de todos los modos de vibrar según la ecuación 3,

$$\ddot{u}^t(x,t) \cong \left[1 - \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) \right] \ddot{u}_g(t) + \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) A_i(t) \quad (3)$$

donde m es el número de modos considerados en la respuesta, Γ_i es el factor de participación del i -ésimo modo de vibrar, $\phi_i(x)$ es la amplitud de la i -ésima forma modal a una altura x , $A_i(t)$ es la aceleración absoluta de un sistema de 1GDL con un periodo y amortiguamiento iguales a ese del i -ésimo modo de vibrar ante un movimiento del suelo $\ddot{u}_g(t)$.

En este trabajo consideraremos constantes en altura las propiedades dinámicas ρ , GA_o y EI_o ya que Miranda y Taghavi (2005) observaron que en general la respuesta de edificios comunes no es sensible a la variación con la altura. El modelo del oscilador de varios grados de libertad requiere de tres parámetros: T , el periodo fundamental, ξ , el amortiguamiento crítico para los diferentes formas modales y α . Este último controla el grado de participación de las deformaciones laterales del oscilador causadas por un comportamiento de viga de cortante y viga de flexión, de manera que valores de α que tiendan a cero representan un oscilador que se deforma como viga de flexión, y valores de α grandes (mayores que 10) representan un oscilador que se deforma como viga de cortante. En el caso de edificios, aquellos cuya resistencia lateral está dada por muros de cortante tenderán a deformarse como una viga de flexión, y tendrán valores bajos de α , y edificios formados por marcos tenderán a deformarse como una viga de cortante, y tendrán valores de α grandes (Miranda y Reyes, 2002).

APLICACIÓN

Respuesta lineal de las estructuras analizadas

Presentamos la respuesta de osciladores de varios grados de libertad ante los acelerogramas simulados en las estaciones CU y SCT, con periodos estructurales que van de 0.1 a 4 segundos. Se usa el método simplificado con $\alpha=4$ (que está dentro de los valores que corresponden a una deformación como viga de flexión) y $\alpha=10$ (que está dentro de los valores que corresponden a una deformación como viga de cortante), el amortiguamiento crítico considerado es del 5 % para cada uno de los seis modos de vibrar. Esto se realiza para observar las diferencias de comportamiento de las estructuras ante los dos tipos de sismos, así como también denotar la importancia que toma el tipo de estructuración en la respuesta.

En la figura 3 se presentan las amplificaciones entre la aceleración máxima de cada piso del oscilador (PFA, *Peak Floor Acceleration*) y la aceleración máxima del suelo (PGA, *Peak Ground*

Acceleration), PFA/PGA, para cuatro alturas relativas ($h/H=1.00, 0.75, 0.50$ y 0.25) para osciladores de varios grados de libertad con periodos entre 0.1 a 4 segundos. La figura tiene resultados para CU (figura 3a) y para SCT (figura 3b) y los resultados son para los dos tipos de eventos. Las gráficas representan tres casos: 1) método simplificado con $\alpha=4$ (línea continua delgada), 2) $\alpha=10$ (línea continua gruesa) y 3) respuesta de un sistema de 1GDL normalizado por la aceleración máxima del suelo (PGA) (línea discontinua). Para *terreno firme* (figura 3a) se observa que para $h/H < 0.25$ la relación PFA/PGA permanece casi constante ante la excitación de subducción, en cambio para falla normal hay una mayor variación de ésta y depende sensiblemente para algunos periodos del tipo de estructuración dado por α . La amplificación, PFA/PGA, en las diferentes alturas relativas, h/H , es mayor en periodos inferiores a un segundo para el sismo de falla normal que para el sismo de subducción; por otro lado, para el sismo de subducción se presentan amplificaciones más grande en periodos mayores a un segundo. También se puede apreciar que el espectro de respuesta del sistema de 1GDL normalizado por la aceleración máxima del suelo (línea discontinua) es muy similar al método simplificado para estructuras con periodos cortos pero para periodos largos la amplificación en la azotea es menor. Esto es debido a que éste es un modelo de varios grados de libertad que considera distintas deformaciones laterales, y el sistema de 1GDL considera sólo un modo y una deformación lineal. Sin embargo, el sistema de 1GDL da una buena idea de la forma como se amplifica el nivel superior con respecto al movimiento de la base. Por otro lado, se observa que el tipo de estructuración (dado por α) es importante en los efectos de amplificación en los edificios para periodos largos, apreciándose más en los eventos de falla normal que en sismos de subducción. Esto se puede ver para estructuras con $\alpha=10$ cuya respuesta es distinta para periodos estructurales mayores a un segundo con respecto a estructuras con $\alpha=4$, donde los modos superiores tienen mayor participación. Es decir, que en marcos contraventeados o marcos con muros ($\alpha=4$, deformación a flexión) donde se esperan que las deformaciones a flexión tiendan a predominar sobre las deformaciones a cortante, para periodos estructurales largos las amplificaciones serán mayores con respecto a la aceleración máxima del suelo debido a sismos de falla normal. Por otro lado en *terreno blando* (figura 3b) se obtienen resultados similares a terreno firme. Se observa que para relaciones de $h/H < 0.25$ las amplificaciones permanecen casi constantes; la amplificaciones son mayores para sismos de subducción con respecto a sismos de falla normal en periodos alrededor del periodo suelo ($T_s \approx 1.9s$) y para sismos de falla normal en periodos menores a un segundo resulta una mayor amplificación, principalmente en el segundo modo de vibrar del suelo; el sistema de 1GDL predice las amplificaciones en la azotea para periodos menores a un segundo y los subestima en periodos más grandes ($T > 1s$). El tipo de estructuración (dado por α) toma importancia para periodos largos principalmente ante sismos de falla normal pero en mucho menor medida que lo observado en terreno firme.

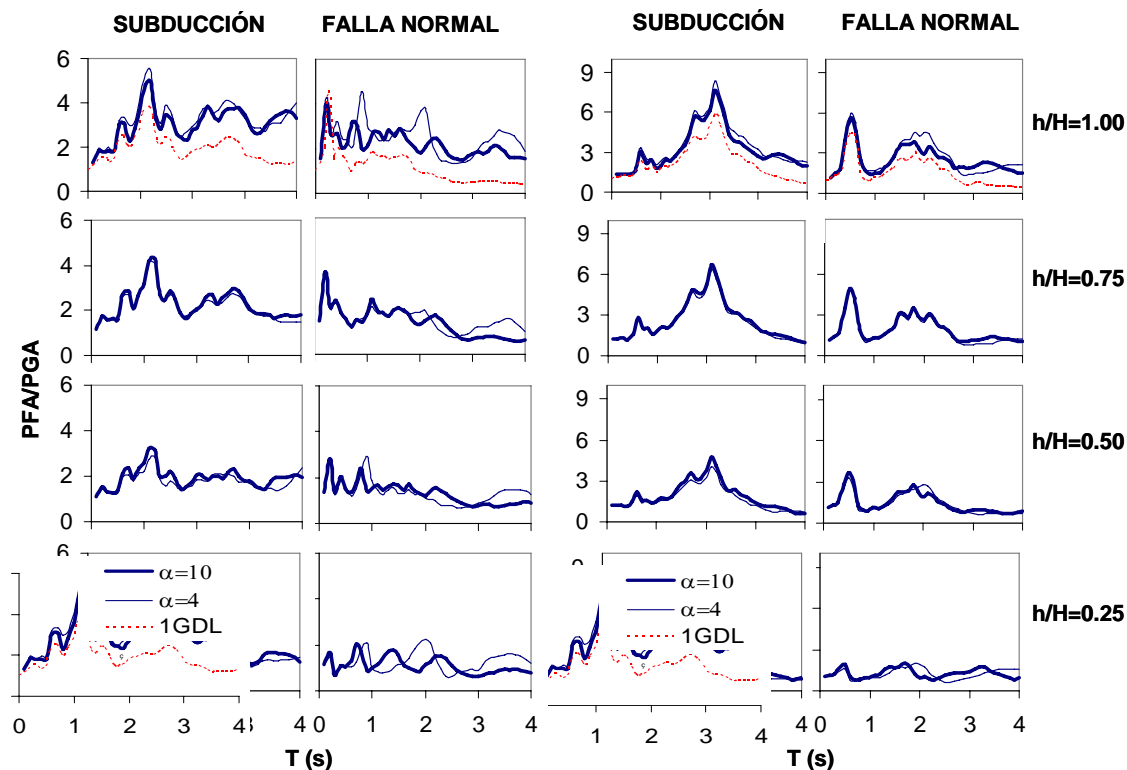
En la figura 4 se muestra la altura normalizada (h/H) contra las aceleraciones máximas de cada piso normalizadas a su vez con respecto a la del suelo (PFA/PGA) para diferentes osciladores caracterizados por su periodo. Los periodos mostrados son $T=0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 3$ y 4 segundos para CU y $T=0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3$ y 4 segundos para SCT, y corresponden a la respuesta de osciladores ante los sismos de subducción y falla normal con $\alpha=4$ (línea continua gruesa) y $\alpha=10$ (línea discontinua delgada). Nótese que la escala horizontal es distinta para todos los periodos. Para terreno firme (figura 4a) se observa que para osciladores con periodo menor a un segundo los sismos de falla normal generan relaciones de amplificación, PFA/PGA, mayores

que los sismos de subducción y para estructuras con periodo mayor a un segundo son los eventos de subducción los que provocan mayores amplificaciones en pisos superiores. Se aprecia que la relación PFA/PGA tiene una variación suave en las diferentes alturas relativas (h/H) en periodos menores a un segundo para ambos eventos debido principalmente a que el primer modo tiene mayor contribución en la respuesta estructural, es decir, que la participación de los modos superiores para este intervalo resulta de menor relevancia. Una excepción es el caso del oscilador con un periodo de $T=0.3$ segundos sometido al sismo de falla normal donde existe una deamplificación con respecto a la base en $h/H \approx 0.25$ debida a la participación del segundo modo de vibrar. En cambio, los osciladores con periodo estructural mayor ($T > 1s$), presentan una variación más irregular conforme el periodo crece; esto es porque los modos superiores comienzan a tener una mayor participación modal para ambos eventos. Pero es ante los eventos de falla normal donde se observa que los modos superiores tienen una mayor importancia (figura 4a parte inferior, $T=1, 2, 3$ y $4s$) debido al contenido de alta frecuencia en este tipo de sismos. Por otro lado, para estructuras con periodos estructurales menores a un segundo la configuración estructural (dado por α) no varía significativamente, es decir, que la deformaciones laterales como viga de cortante o como viga de flexión (sistema de marcos, $\alpha=10$ y sistema de marcos con muros de cortante o marcos contraventeados, $\alpha=4$) tanto en azotea como en pisos intermedios serán aproximadamente los mismos independientemente de la configuración tomada; en cambio para estructuras con periodos mayores ($T > 1s$) la configuración estructural influye en el tipo de movimiento lateral que tendrá la estructura tanto en azotea como en niveles inferiores, principalmente ante eventos de falla normal. Para *terreno blando* (figura 4b) se observan algunas similitudes a lo observado en terreno firme. La relación PFA/PGA es mucho mayor para el sismo de profundidad intermedia en periodos menores de 0.5 segundos con respecto al de subducción; la variación de PFA/PGA es suave en periodos menores al periodo del suelo ($T_s \approx 1.9s$) independientemente del tipo de evento sísmico y tiende a ser más irregular para periodos mayores, la configuración estructural toma mayor importancia en periodos mayores al periodo del suelo principalmente ante sismos de falla normal (figura 4b, $T=2, 3$ y $4s$).

Espectros inelásticos

En esta parte analizamos los espectros de respuesta elastoplásticos de un sistema de 1GDL en los sitios estudiados ante los dos tipos de fuentes sísmicas en las que se muestran diferencias importantes entre aquellos, tanto en terreno firme como en zona de lago, principalmente en periodos cortos. En la figura 5 se muestra una representación espacial de los espectros inelásticos donde se observa la resistencia por unidad de masa (R/m) en cada periodo para que el sistema de 1GDL desarrolle la demanda de ductilidad requerida. La figura tiene resultados para CU (figura 5a) y SCT (figura 5b) y los resultados son para demandas de ductilidad de 1 a 4. En estos cálculos se considera un modelo de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico perfecto y un amortiguamiento del 5 %. Se observa para el sitio en terreno firme (figura 5a) que para periodos menores a un segundo la resistencia estructural que se debe proporcionar al sistema debido a sismos de falla normal es mayor para todos los valores de ductilidad que los valores de subducción; para periodos mayores a éste la resistencia está regida por eventos de tipo subducción. Para terreno blando (figura 5b) se puede apreciar algo similar en donde la resistencia que se debe proporcionar a los sistemas con periodos estructurales entre 0.1 y 1 es mayor para los sismos de falla normal (principalmente para el segundo modo del suelo $T_{s2} \approx 0.5s$), y para

periodos mayores a estos, (principalmente alrededor del periodo fundamental del suelo, $T_s \approx 1.9s$) son más importantes las demandas de resistencia debido a los de subducción.



a) Estación CU en terreno firme

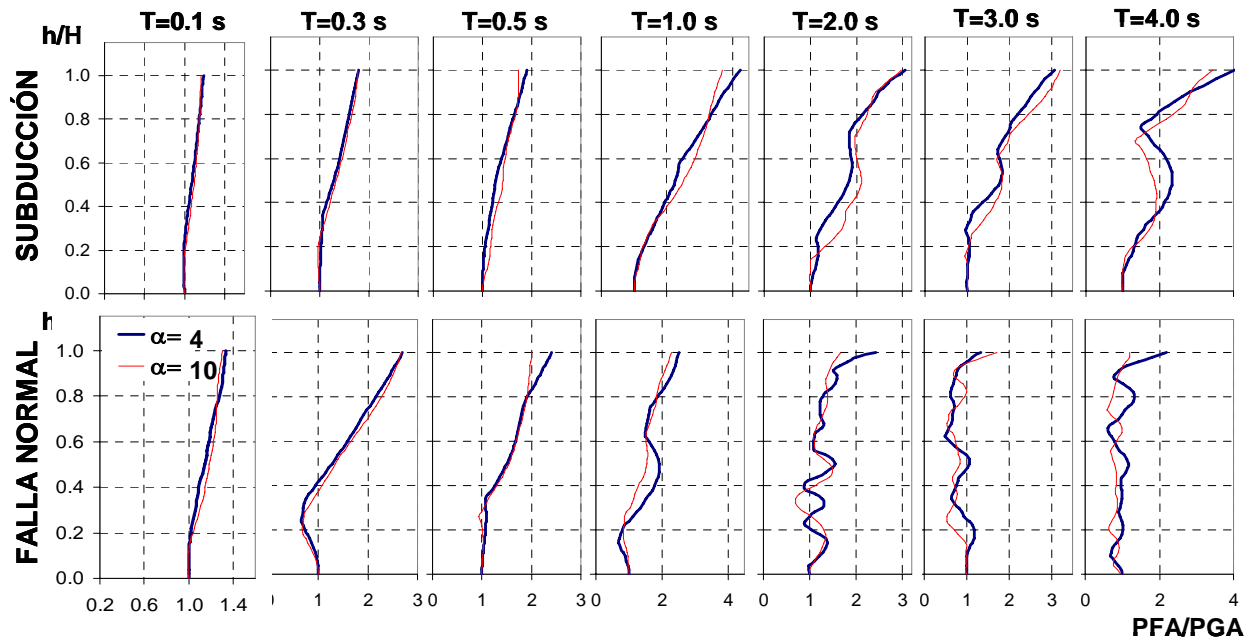
b) Estación SCT en terreno blando

Figura 3. Espectros de piso de aceleración normalizados con respecto a la aceleración del suelo (PFA/PGA) para cuatro alturas (h) normalizadas (h/H) ante sismos de subducción y falla normal para tres condiciones: método simplificado con $\alpha=4$ y con $\alpha=10$, y respuesta de un oscilador de 1GDL

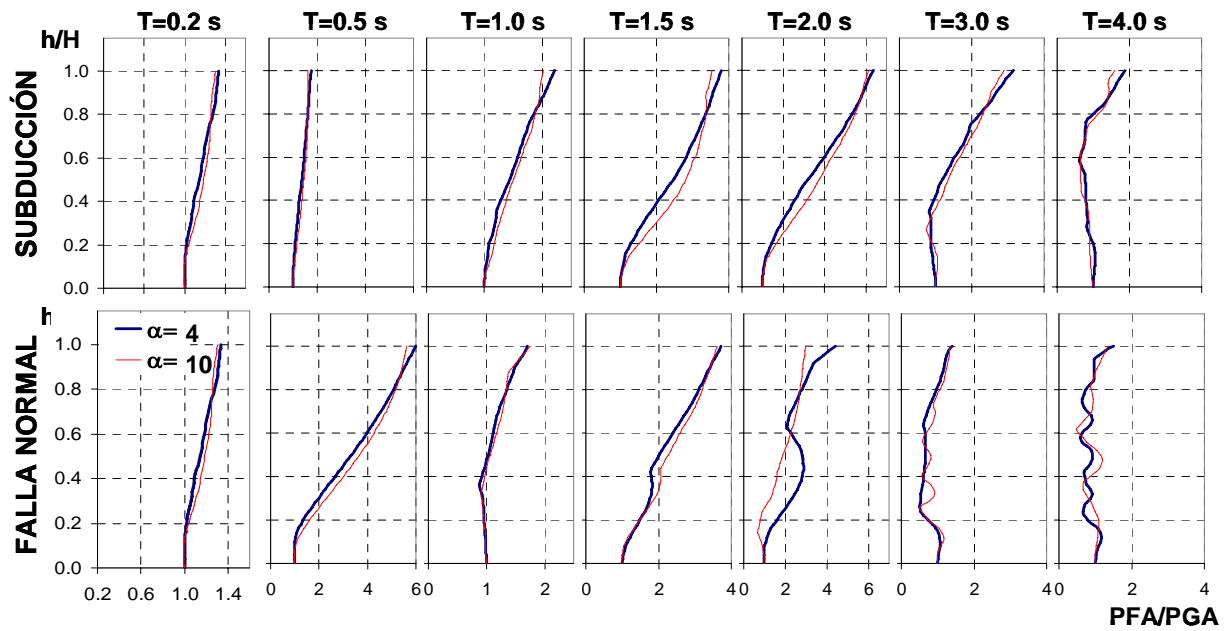
Energía de entrada

La energía de entrada permite representar el daño acumulado del movimiento sísmico por considerar efectos importantes como la duración y la carga repetida.

La aceleración máxima del suelo o de la respuesta de un oscilador no siempre tiene una correlación directa con la duración del movimiento del suelo. Se ha mostrado que la duración puede tener un efecto significativo en las demandas de deformación inelástica y de disipación de energía (Mahin, 1980). Asumiendo que la duración es importante en el daño acumulado de la estructura se estudia el espectro de energía de entrada elástico (E_I). La E_I permite representar el daño potencial total del movimiento del terreno provocado por el sismo debido a que considera tanto la amplitud como la duración del evento.



a) Estación CU en terreno firme



b) Estación SCT en terreno blando

Figura 4. Aceleración máxima de piso para distintos periodos estructurales normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) contra la altura normalizada (h/H) ante eventos de subducción y falla normal considerando dos tipos de deformación lateral: flexión ($\alpha=4$) y cortante ($\alpha=10$)

En la figura 6 se observa la variación de los espectros de energía de entrada de los eventos simulados. Se observa que la E_I es mucho mayor para el evento simulado de la brecha de Guerrero que para el de Profundidad Intermedia Centro (recordemos que ambos movimientos tienen la misma $A_{S_{MAX}}$). Esta diferencia es causada por una mayor duración y amplitud como se observa en la figura 2. Como era de esperarse la E_I en terreno firme se concentra en periodos intermedios ($1 < T < 2s$) para el sismo de falla normal y en periodos relativamente largos para el de subducción (figura 6a). Se puede observar que los picos de los espectros de energía para CU están concentrados en periodos alrededor de $T \approx 2.5$ y 1.5 segundos para subducción y falla normal, respectivamente. Esto es usual para la ciudad de México, pero inusual para muchos sitios de terreno firme en el mundo, debido a que los sismos que afectan a la ciudad de México se presentan a una mayor distancia con respecto a los que ocurren en otras partes del mundo, predominado el contenido de energía en periodos largos. Para SCT (figura 6b) se observa que la mayor concentración de energía está entre los periodos 1 y 3, siendo mucho mayor la amplitud en el periodo fundamental del suelo ($T_s \approx 1.9s$) para las simulaciones de subducción. Para los eventos de profundidad intermedia la E_I calculada presenta un pequeñísimo pico de E_I en $T \approx 0.5$ segundos. Esta concentración de energía es importante para estructuras con periodos similares a este como se hace notar en la siguiente sección.

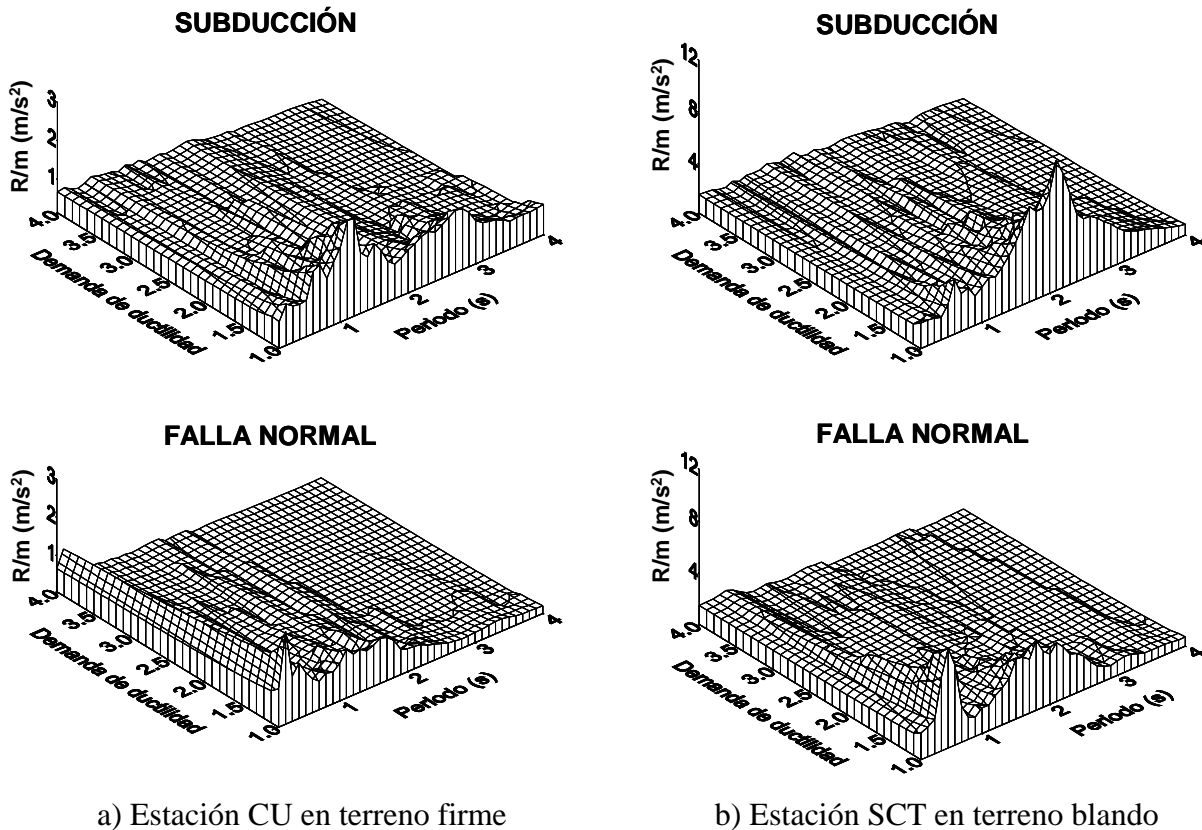


Figura 5. Representación espacial de la variación de la resistencia por unidad de masa (R/m) con la demanda de ductilidad ante sismos de subducción (parte superior) y de falla normal (parte inferior)

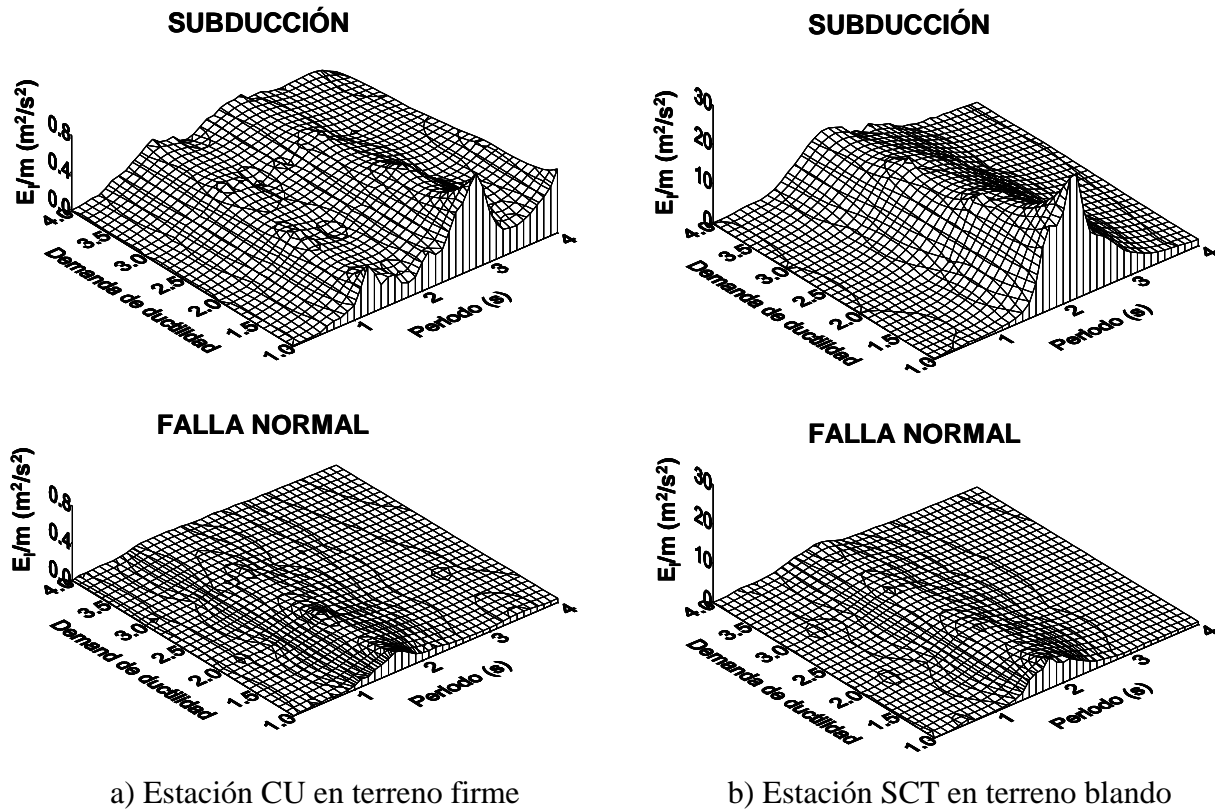


Figura 6. Representación espacial de la variación de los espectros de energía de entrada para sismos de subducción (parte superior) y de falla normal (parte inferior)

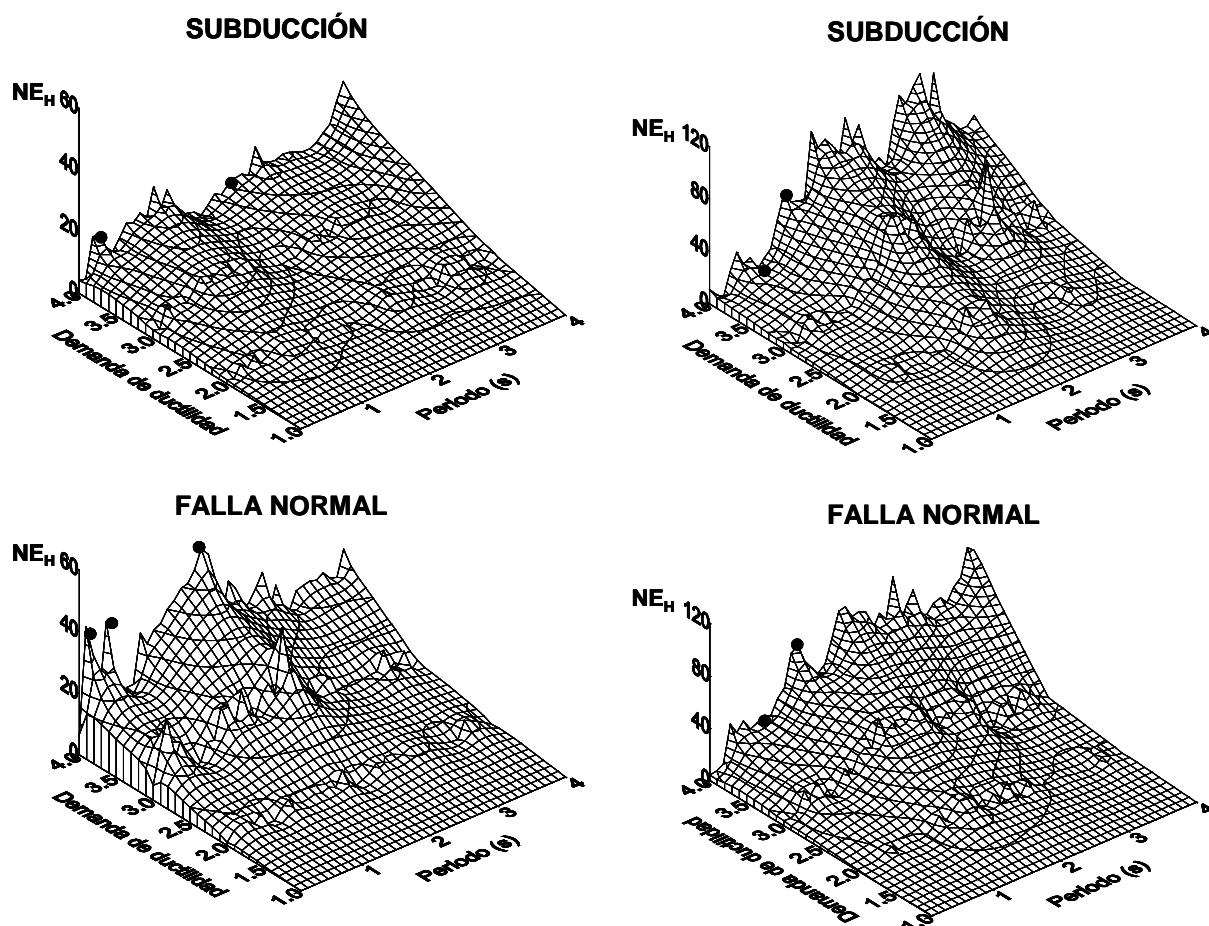
Energía de histéresis normalizada

Un parámetro que se correlaciona bien con las demandas acumuladas de deformación plástica y por lo tanto con el daño que la estructura pueda tener es la energía de histéresis normalizada, NE_H (Téran-Gilmore, 1996) dada por la ecuación 4,

$$NE_H = \frac{E_H}{x_y F_y} \quad (4)$$

Donde E_H es la energía de histéresis, x_y es el desplazamiento de fluencia y F_y es la resistencia de fluencia. El producto de estos dos últimos valores representa una proporción de la energía elástica de deformación almacenada cuando los elementos estructurales son llevados hasta el nivel de fluencia. Terán-Gilmore (1996) indica que valores similares de E_H pueden estar asociados a sistemas que tienen gran resistencia y pocos ciclos de carga y a sistemas que tienen poca resistencia y muchos ciclos de carga. Para diferenciar la severidad de las deformaciones plásticas acumuladas en casos como estos puede utilizarse el concepto de NE_H .

En la figura 7 se muestra la representación espacial de los espectros de NE_H de los eventos simulados para distintas demandas de ductilidad. Se observa (puntos negros) para terreno firme (figura 7a) que para periodos $T < 2$ segundos la NE_H resulta mayor para los de profundidad intermedia ($NE_H \approx 40$) con respecto a los de subducción ($NE_H \approx 20$). Para CU, al igual que lo mostrado en la figura 6a, los movimientos demuestran un alto contenido de energía para valores relativamente largos de periodo. Para SCT (figura 7b) se observa una pequeña diferencia en periodos menores a un segundo para subducción ($NE_H \approx 20$) y para falla normal ($NE_H \approx 40$). Estos resultados indican que los eventos de subducción son sin duda determinantes en el riesgo sísmico de estructuras en estos sitios del valle de México; sin embargo, se puede esperar que los sismos de falla normal puedan causar daños en estructuras con periodos de $0 < T < 1.0$ segundos en terreno firme y en menor medida en zona de lago para periodos cortos.



a) Estación CU en terreno firme

b) Estación SCT en terreno blando

Figura 7. Representación espacial de la variación de los espectros de energía de histéresis normalizada para sismos de subducción y de falla normal

OBSERVACIONES DE EDIFICIOS INSTRUMENTADOS ANTE EVENTOS REGISTRADOS DE SUBDUCCIÓN Y FALLA NORMAL

Se estudiaron tres edificios instrumentados que tuvieron registrados en sus diferentes niveles eventos ocurridos en México entre los años de 1994 y 2000 debido a sismos de subducción y falla normal (figura 1). Las respuestas observadas se comparan con las calculadas por medio del método simplificado con la finalidad de observar la respuesta en otros niveles de los edificios donde no se tiene instrumento debido a que en algunos casos sólo se cuenta con registros en la azotea y se desconoce cómo se comporta en pisos intermedios. Para ello se determinan los parámetros requeridos como el periodo de la estructura, T , amortiguamiento, ζ , y el parámetro α . La tabla 2 contiene datos de los eventos y parámetros utilizados al emplear el método simplificado: edificio, fecha y tipo de evento, magnitud y distancia, dirección analizada, aceleración máxima del suelo (PGA, *Peak Ground Acceleration*), periodo de la estructura, amortiguamiento y el parámetro α . Los parámetros se calculan para cada estructura y en cada dirección, es decir, que estos varían de evento a evento debido a que se ha observado que el periodo y amortiguamiento de algunas estructuras que han presentado comportamiento no lineal o han sido reestructuradas se han modificado en los últimos diez años (Arredondo y otros, 2004). Los edificios seleccionados son: PC y MJ en zona de lago y el edificio PI en terreno firme de la ciudad de México.

Tabla 2. Parámetros empleados de eventos registrados en edificios instrumentados

Edificio	Evento	Tipo	M	R	Dirección	PGA (m/s ²)	T (s)	ζ	α
PC	10/12/94	SUB	6.6	290	L	0.100	2.55	0.045	0.0
					T	0.173	2.70	0.030	3.7
	21/07/00	FN	6.3	140	L	0.110	2.72	0.029	0.0
					T	0.130	2.72	0.020	4.5
MJ	14/09/95	SUB	7.4	260	L	0.320	0.65	0.048	3.5
					T	0.320	0.68	0.050	4.0
	15/06/99	FN	6.5	230	L	0.210	0.65	0.048	3.5
					T	0.150	0.68	0.050	4.0
PI	09/10/95	SUB	8.0	590	L	0.02	1.50	0.009	3.1
					T	0.02	1.49	0.014	8.0
	23/05/94	FN	6.2	210	L	0.03	1.47	0.010	1.8
					T	0.04	1.47	0.014	7.9

Edificio PC

Es una estructura de 18 niveles formada originalmente por marcos de concreto reforzado en las dos direcciones; posteriormente la dirección transversal y longitudinal fueron reforzados con muros de concreto que se extienden desde la losa de sótano hasta la azotea (Pavón y Rodríguez, 1990). Se encuentra desplantado en *terreno blando* de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2.2 segundos. El edificio presenta un periodo estructural promedio de 2.63 y 2.71 en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. En la tabla 2 se presentan

los parámetros utilizados para obtener la respuesta mediante el método simplificado ante los dos eventos estudiados.

En la figura 8 se muestran las aceleraciones máximas observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua), ante los sismos (ver figura 1) de subducción del 10 de diciembre de 1994 ($M_w=6.6$, $R=290$ km) y de falla normal del 21 de julio de 2000 ($M_w=6.3$, $R=140$ km). Se observa que a pesar de que las aceleraciones máximas del suelo son similares para ambos sismos (tabla 2), las amplificaciones, PFA/PGA, son mayores en los diferentes niveles para el evento de subducción (10/Dic/94) con respecto al de falla normal (21/Jul/00) por las razones expuestas en las figuras 3 y 4. El modelo simplificado permite tener una mejor apreciación de estas diferencias y de los efectos que tienen estos dos tipos de eventos en la estructura. Estas diferencias son debidas a que los sismos de falla normal para estructuras con periodo estructural mayor al periodo del suelo (en este caso el periodo promedio de la estructura tanto en dirección longitudinal, $T \approx 2.63s$, como en dirección transversal, $T \approx 2.71s$, resultan mayores al del periodo del suelo, $T_s \approx 2.2s$) provocan que los modos superiores tengan mayor participación en la respuesta del edificio.

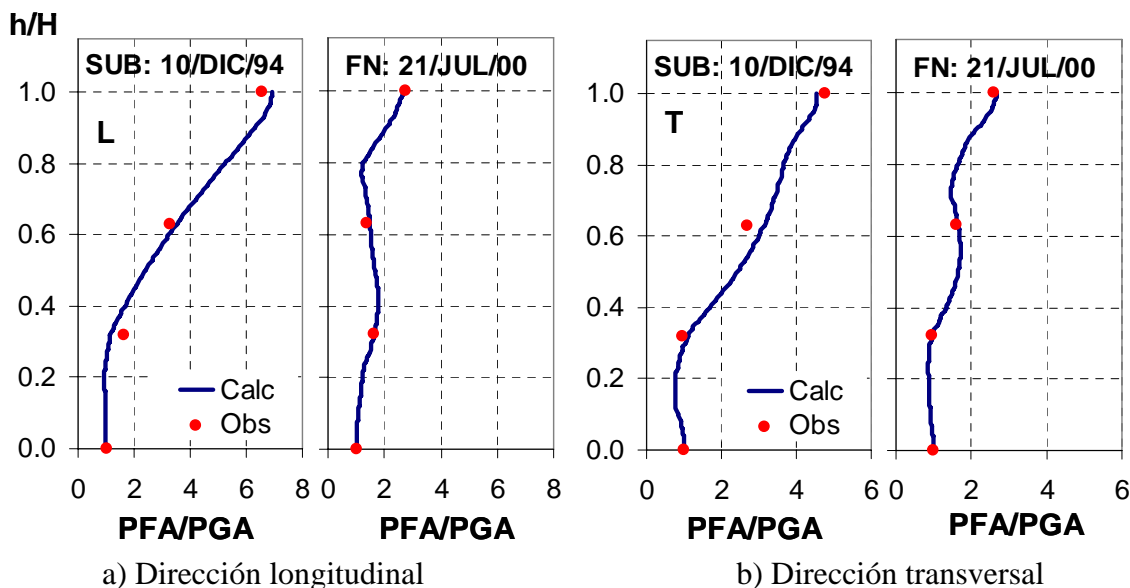


Figura 8. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PC ubicado en zona de lago

Lo anterior también se aprecia en la figura 9 en la que se presentan los espectros de respuesta en diferentes niveles instrumentados ($h/H=1.00$, 0.63 , 0.32) y no instrumentados ($h/H=0.75$ y 0.15) del edificio PC. Se observa cómo la respuesta observada es similar a la calculada con el método simplificado en los niveles instrumentados lo que valida el uso del método para extrapolar a pisos no instrumentados. Por otro lado se observa que ante el evento de falla normal (21/07/00) la participación de los modos superiores (segundo y tercer modo principalmente) son mayores inclusive que la del primer modo de la estructura (excepto en el

nivel $h/H \approx 0.75$ donde se presenta un punto de inflexión de los modos superiores a este nivel) en comparación con el sismo de subducción (10/12/94) donde el primer modo es dominante en ambas direcciones del edificio. Por lo tanto la mayor participación de los modos superiores no sólo podría generar mayores distorsiones en pisos superiores sino además un mayor daño en los contenidos de los edificios debido a que son mayores las intensidades en los diferentes niveles en periodos menores con respecto al modo fundamental de la estructura o que, por ejemplo, un contenido con periodo de 0.8s ubicado en cualquier piso (excepto nivel $h/H \approx 0.75$) sufra mayores demandas para un sismo de falla normal que para uno de subducción.

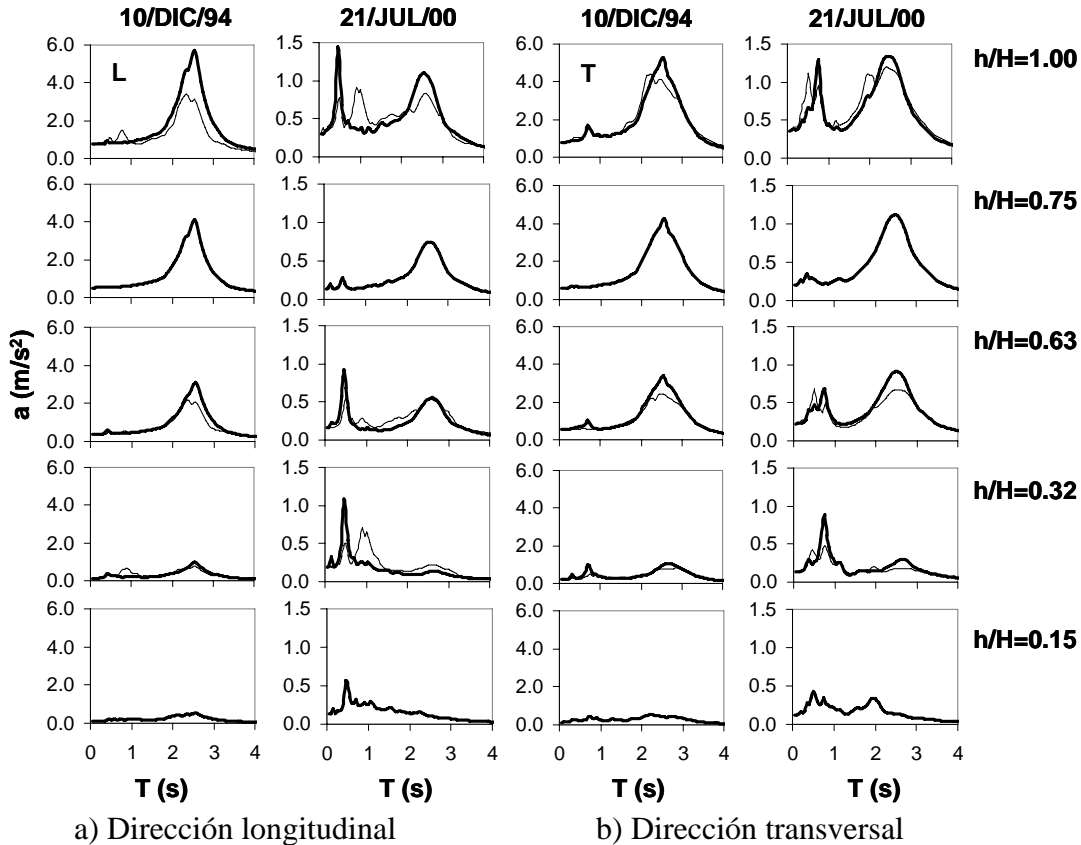


Figura 9. Respuesta en los diferentes niveles del edificio PC (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

Edificio MJ

Está ubicado cerca de la estación del metro Juárez. Tiene 7 niveles. La estructura original estaba formada por marcos de concreto reforzado y posteriormente fue reforzada con encamisado de columnas con placas de acero y colocando contraventeos de acero en ambas direcciones y muros de concreto en la dirección longitudinal. El edificio está desplantado en *terreno blando* de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2 segundos. En la tabla 2 se indica los parámetros empleados al aplicar el método simplificado para reproducir adecuadamente la respuesta. La estructura tiene un periodo promedio de 0.65 y 0.68 en la dirección longitudinal y

transversal, respectivamente, ante los dos eventos sísmicos analizados (ver figura 1) del 14 de septiembre de 1995 ($M_w=7.4$, $R=260$ km) de subducción y el del 15 de junio de 1999 ($M_w=6.5$, $R=230$ km) de falla normal. Estos dos eventos se consideraron en esta estructura porque se presentaron después de que el edificio fue reforzado en el año de 1992 con los muros de concreto.

En la figura 10 se presentan al igual que en la figura 8 pero para el edificio MJ, las aceleraciones observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua). En esta figura se puede observar que la respuesta obtenida por medio del método simplificado (línea continua) con respecto al observado (puntos) considerando sólo tres parámetros está bien aproximada, y que gracias al método simplificado se tiene una buena idea del tipo de configuración que presentó la estructura ante los dos eventos. La relación PFA/PGA es mayor para el evento de falla normal a pesar que el sismo de subducción presenta una mayor aceleración del suelo ($PGA=0.32m/s^2$) que el de falla normal ($PGA=0.21m/s^2$); esto debido a que el contenido de alta frecuencia del sismo de falla normal provoca en este caso intensidades espectrales similares al sismo de subducción (ver figura 5). También se observa lo que anteriormente se había mencionado (figura 4) que cuando el periodo de la estructura es menor que el periodo del suelo, el modo que más participa en la estructura debido a sismos de subducción y falla normal es el primer modo. Es decir, como el edificio tiene un periodo de $T \approx 0.65s$ en la dirección longitudinal y un periodo de $T \approx 0.68s$ en la dirección transversal (ambos menores que el periodo del suelo, $T_s \approx 2s$) provoca que predomine el primer modo del edificio.

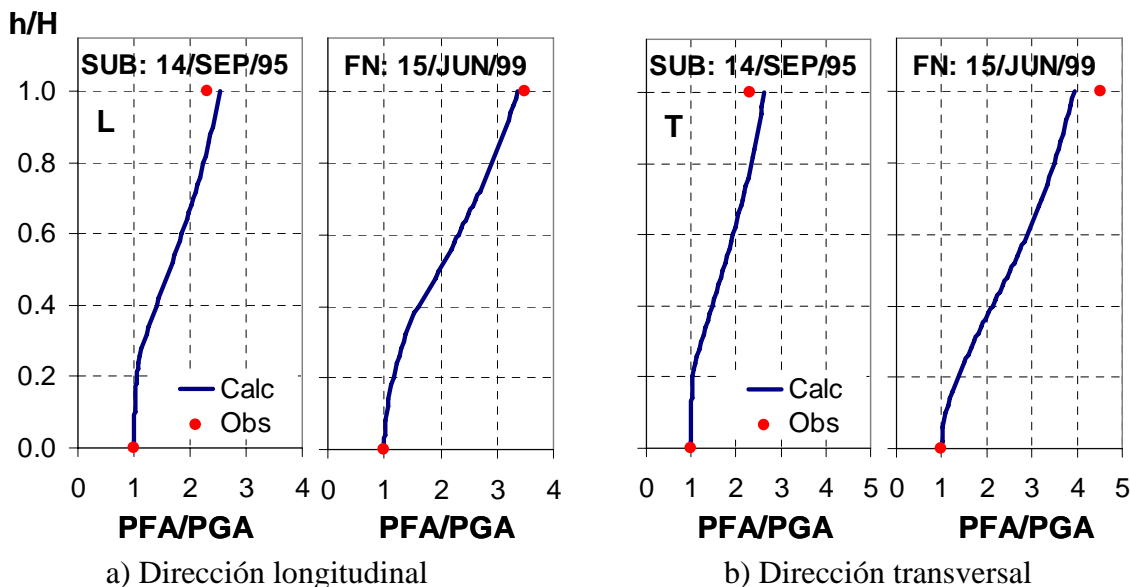


Figura 10. Aceleración máxima del piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio MJ ubicado en zona de lago

En la figura 11 se presentan los espectros de respuesta de piso de la azotea, único piso instrumentado en el edificio; se muestra como la respuesta obtenida con el método analítico

(línea gruesa) es casi idéntica a la respuesta observada (línea delgada) y como es el primer modo ($T \approx 0.65s$ y de $T \approx 0.68s$) el que tiene mayor participación para ambos tipos de eventos.

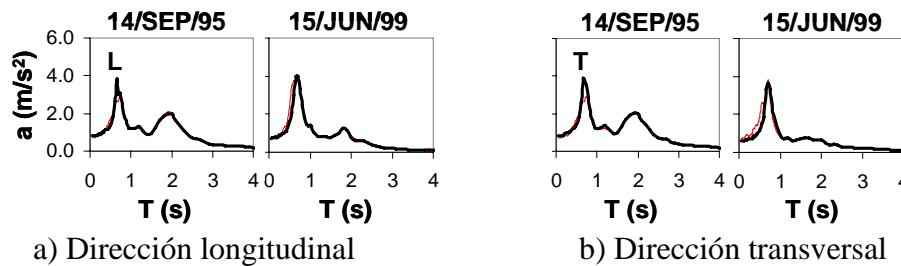


Figura 11. Respuesta en la azotea del edificio MJ (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 14/Sep/95 y 15/Jun/99

Edificio PI (Torre IV)

Esta estructura está integrada por cuatro torres (I, II, III y IV) de marcos de concreto reforzado con una altura mayor de 60 m, unidas en los 6 niveles inferiores. Las torres I y II fueron construidas en 1982 mientras que las III y IV datan de 1992. El edificio se encuentra instrumentado en las torres I y IV. Está desplantado en *terreno firme* de la ciudad de México. Este edificio presenta un periodo estructural aproximado de 1.485 y 1.48 segundos en la torre IV y de 1.68 y 1.92 segundos en la torre I, en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Se analizó la torre IV porque se contaba con información sobre los dos tipos de sismos que se han manejado en el trabajo. En la tabla 2 se presentan los parámetros utilizados para reproducir por medio del método simplificado esta estructura ante los dos eventos analizados (figura 1): 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$, $R=590$ km) de subducción y el del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.2$, $R=210$ km) de falla normal.

En la figura 12 se presenta al igual que en las figuras 8 (edificio PC) y 10 (edificio MJ) los cocientes PFA/PGA con respecto a su altura normalizada (h/H) tanto los observados (puntos) como los calculados (línea continua) para el edificio PI. Las observaciones hechas para los edificios desplantados en terreno blando son también válidas en terreno firme. La estructura ante el evento de falla normal presenta mayor participación de los modos superiores con respecto al de subducción. La mayor participación de los modos superiores en el sismo de falla normal (23/may/94) puede provocar mayores movimientos laterales en niveles superiores con respecto al observado de subducción (09/oct/94) como se indica en la figura con una línea horizontal para ambas direcciones del edificio. Se observa cómo la amplificación en pisos superiores es mayor ante el sismo de falla normal con respecto al de subducción.

En la figura 13 se presenta la respuesta tanto en niveles donde hay registro ($h/H \approx 1.00$ y 0.325) como en donde no lo hay ($h/H \approx 0.75$ y 0.15) del edificio PI (línea delgada, observada, y línea gruesa, calculada con el método simplificado). En esta figura se aprecia al igual que en el edificio PC (figura 9) cómo cuando la estructura tiene un periodo estructural mayor al periodo del suelo da como resultado que los modos superiores tengan mayor participación ante este tipo de eventos (excepto en el nivel $h/H \approx 0.75$ donde no hay contribución de modos superiores debido a

que coincidentemente se presenta en esa altura un punto de inflexión). Esto implica, no sólo posibles daños en pisos superiores sino mayor daño en los contenidos del edificio.

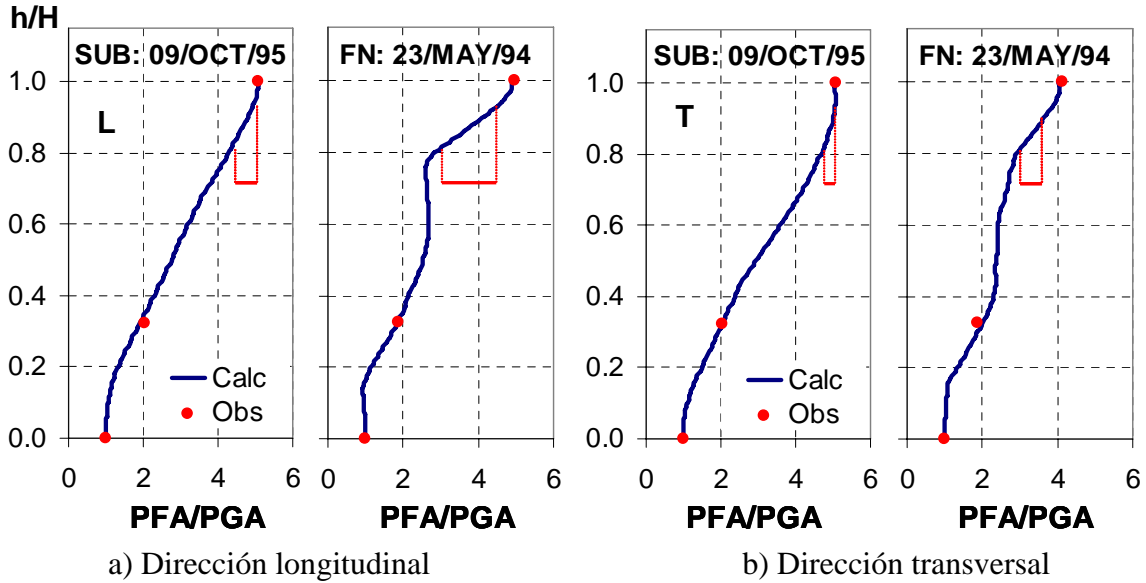


Figura 12. Aceleración máxima del piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PI ubicado en terreno firme

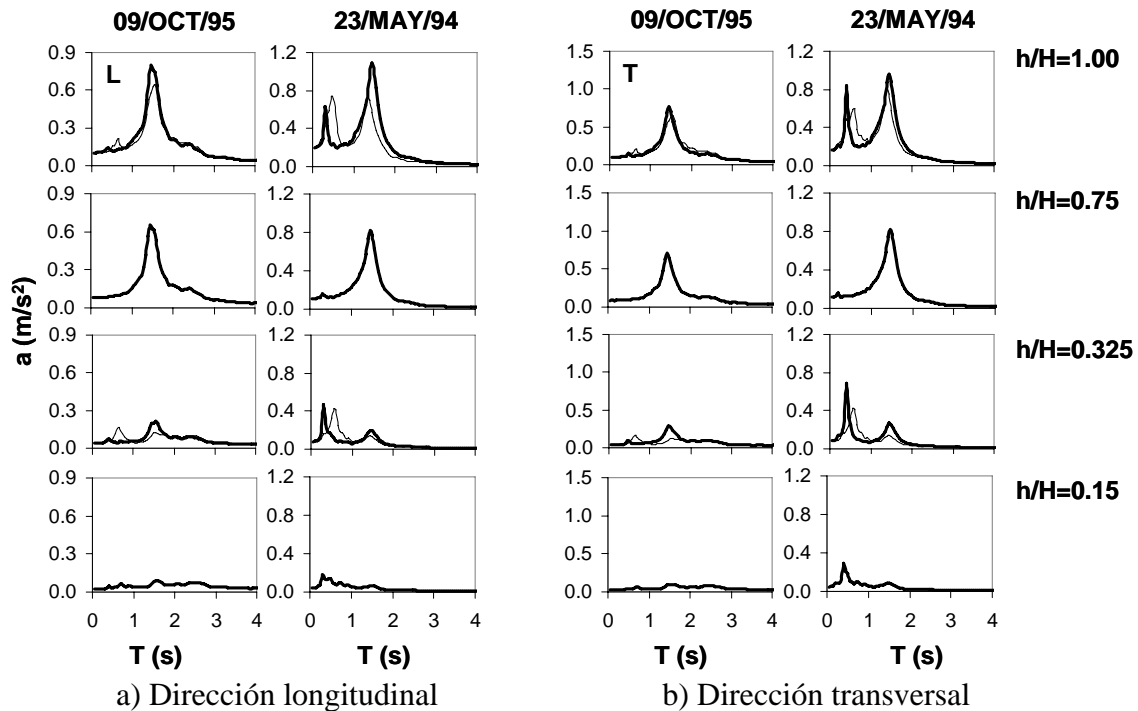


Figura 13. Respuesta en diferentes niveles del edificio PI (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en terreno firme ante los sismos del 09/Oct/95 y 23/May/94

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron las diferencias en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en el valle de México ante dos tipos de eventos: subducción y falla normal. Se muestran diferencias importantes en periodos cortos ($T < 1.0s$) en los espectros de respuesta inelásticos, en la energía de entrada y en la energía histéresis normalizada de sistemas de 1GDL sobre todo en terreno firme, teniendo mayor intensidad los sismos de falla normal con respecto a los de subducción. Estos resultados indican que se pueden esperar mayores demandas inelásticas en las estructuras ante sismos de profundidad intermedia.

Se estudiaron eventos sísmicos registrados en edificios instrumentados tanto en terreno firme como en zona de lago de la ciudad de México. Se encuentra que los modos superiores pueden tener una gran influencia cuando los sismos son de falla normal. Estos modos superiores provocan una mayor intensidad en periodos cortos que podrían afectar a los contenidos en las estructuras y causar daños en pisos superiores.

Las amplificaciones en los pisos superiores con respecto al suelo varían entre 2 y 6 veces, siendo mayores las amplificaciones en estructuras con $T < 1s$ ante sismos de falla normal y para estructuras con $T > 1s$ debido a sismos de subducción. También, es importante considerar el tipo de estructuración del edificio: ante sismos de falla normal para estructuras con periodos mayores a un segundo las amplificaciones en la azotea son mayores para estructuras que se deforman como vigas a flexión (estructuras con muros o contravientos) con respecto a estructuras que se deforman como vigas de cortante (marcos estructurales).

El riesgo sísmico de estructuras en sitios del valle de México está prácticamente dominado por los eventos de subducción, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en este trabajo se puede esperar que los sismos de falla normal causen daños en estructuras con periodos estructurales $T < 1.0s$ en terreno firme y en zona de lago en periodos alrededor del segundo modo fundamental del suelo. También se pueden esperar mayores distorsiones en pisos superiores y daños en contenidos de edificios en los diferentes niveles del edificio debido a este tipo de sismos. Para fines prácticos, es muy importante utilizar acelerogramas de diseño de ambas fuentes sísmicas en la evaluación de la respuesta estructural debido a que no sólo se debe contemplar el uso de grandes sismos de subducción sino también considerar los efectos que tienen los sismos de falla normal en la respuesta estructural.

RECONOCIMIENTOS

El primer autor reconoce y agradece la beca otorgada por el CONACYT.

REFERENCIAS

Arredondo C., Reinoso E. y Miranda E. (2004). "Demandas aproximadas para edificios instrumentados en el valle de México", *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, Gro.

- Furumura R. y Singh S.K. (2002) “Regional wave propagation from Mexican Subduction Zone Earthquakes: The attenuation functions for interpolate and inslab events”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, No. 6, 2110-2125.
- Iglesias, A., Singh, S. K., Pacheco, J. F. y Ordaz M. (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”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, No. 3, 1060-1071.
- Ishikawa Y. y Kameda H. (1988). “Hazard-Consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis”, *Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, II, 89-94.
- Jaimes, M., Ordaz M., Reinoso E. y Flores E. (2004). “Simulación sísmica combinando funciones de Green y análisis probabilístico para una intensidad y distancia incierta de la fuente”, *III Informe de doctorado en el Posgrado de Ingeniería*.
- Mahin, S. A. (1980). “Effects of duration and *aftershocks on inelastic design earthquake*”, *Proc. Eight World conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, 881-888.
- Miranda E. y Reyes C. J. (2002), “Approximate lateral drift demands in multi-story buildings with non-uniform stiffness”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, No. 7, pp. 840-849.
- Miranda E. y Taghavi S. (2005), “Approximate floor acceleration demands in multi-story buildings. I: Formulation”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131, No.2, 203-211.
- Nishenko S. P. y Singh S. K. (1987). “The Acapulco-Ometepec, México earthquake of 1907-1982: Evidence for a variable recurrence history”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 1359-1367.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S. K. (1995). “A Scheme of Random Summation of an Empirical Green’s Function to Estimate Ground Motions from Future Large Earthquakes”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, No. 6, 1635-1647.
- Ordaz, M., Miranda, E. y Avilez J. (2000). “Propuesta de espectros de diseño para el DF”, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Pavón R. V. y Rodríguez N. C. (1990). “Instrumentación sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural”, *Seminario Internacional, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.
- Reinoso E. y Miranda E. (2005), “Estimation of floor acceleration demands in high rise buildings during earthquakes”, *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 4, No. 2, 107-130.
- Singh S. K. (2003), “Advances in seismology with impact on earthquake engineering ”, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Conferencia Magistral*, León, Gto.
- Taghavi S. y Miranda E. (2005), “Approximate floor acceleration demands in multi-story buildings. II: Applications”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131, No. 2, 212-220.
- Terán-Gilmore A. (1996) “Performance-Based Earthquake-Resistant Design of Framed Buildings Using Energy Concepts”, *Tesis de Doctorado*, Universidad de California, Berkeley.

COMPARISON OF METHODS TO PREDICT RESPONSE SPECTRA AT INSTRUMENTED SITES GIVEN THE MAGNITUDE AND DISTANCE OF AN EARTHQUAKE

MIGUEL A. JAIMES, EDUARDO REINOSO AND MARIO ORDAZ*

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán 04510, México, DF.

mjaimest@iingen.unam.mx, ere@pumas.iingen.unam.mx, mors@pumas.iingen.unam.mx

Received (received date)

Revised (revised date)

Accepted (accepted date)

We compare four methods, all based on Bayesian regressions, to predict response spectra at instrumented sites, located at the hill and lakebed zones in Mexico City, that have recorded several recent earthquakes. The regressions are built as functions of magnitude and closest distance to the rupture area of the earthquake, using more than 20 subduction earthquakes (thrust-faulting mechanism) recorded since 1964. The four methods are: (1) a regression on observed response spectra; (2) a regression on observed Fourier amplitude spectra and use of random vibration theory to estimate the response spectra, (3) a regression on observed response spectra at the reference hill-zone station multiplied by response spectral ratios; and (4) a regression on Fourier amplitude spectra at the reference hill zone, multiplied by Fourier spectral ratios and use of the random vibration theory to estimate response spectra.

Keywords: Bayesian regression, response spectra, attenuation laws, Mexico City, strong motion data, prediction

1. Introduction

There will be a time in the future when we would have recorded strong ground motion due to all sources of earthquakes and many magnitudes, so there will not be a need for models. At present, unfortunately, we have measured only a small portion of the whole universe of possibilities, and still we need models. A sound approach is to use Bayesian regressions that can combine observed data with results of models.

Response spectra are essential for the seismic design of structures; any effort to accurately predict them should be done. On the other hand, accelerometric information is becoming more and more common since relying on it improves substantially the knowledge and predictions of any intensity parameter, including response spectra. Therefore, obtaining future response spectra based on accelerometric information is a matter of essential interest for the present design of efficient and safe structures.

There are different ways to estimate future response spectra at a given site using observed strong ground motion. The first and most obvious one (Method 1) is to build spectral attenuation laws to estimate spectral acceleration; this implies the computation, through a regression method, of a set of coefficients for each structural period (e.g. Joyner and Boore, 1993). Molas and Yamazaki [1995] proposed a variation where many stations with the same epicentral distance are taken into account in the same regression; in this way, only one coefficient takes into account site effects. In the future, after many earthquakes of different sources and characteristics have been recorded at a site this will be by far the best way of predicting response spectra for unknown scenarios. A second way (Method 2), is to compute attenuation relations of the Fourier amplitude spectra to later estimate the response spectra using the random vibration theory [Cartwright and Longuet-Higgins, 1956; Udawadia and Trifunac, 1974; Ordaz and Reinoso, 1987; Reinoso *et al.*, 1992], a process that also requires knowledge of the strong motion duration. Method 2 is similar to Method 1 and, perhaps, a bit longer. It has been useful to predict response spectra in sites with large site effects and little or null accelerometric information, as has been done to obtain design spectra for the Mexico City code and to obtain expected losses useful for the insurance sector; this method was used since Fourier spectra have theoretical constraints. It is very important to assess the uncertainties of both methods and to decide which one should be used.

For stations located at lakebed sites, that have recorded only one or very few earthquakes, one can imagine another two methods to estimate future response spectra based on reference stations (typically at firm sites) that have recorded many earthquakes. These methods need at least one simultaneous recording at the reference and lakebed sites to compute the empirical amplification. It will be always uncertain, however, whether this relative amplification will remain the same for all estimated strong ground motion or not. But at least for Mexico City, it is well known that the clay behaves almost linearly for most of the sites and that the observed non linear behavior, if any, is small and can be accounted for by simple models [Reinoso and Ordaz, 1999]. The first method for lakebed sites (Method 3) requires computation of response spectral ratios; although these ratios do not have any physical meaning, they manage to represent the amplification in the response spectral domain [Rosenblueth and Arciniega, 1992; Reyes, 1999]. The second method for lakebed sites (Method 4) is to obtain an empirical transfer function using Fourier amplitude spectra at the site and at the reference station [Singh *et al.*, 1988; Reinoso and Ordaz, 1999] and then, with the estimated Fourier amplitude spectra at the reference station, the use of random vibration theory and the strong motion duration, to determine the response spectra. Figure 1 shows a diagram describing each one of these methods.

In what follows we present the application of four methods to predict response spectra in Mexico City comparing their uncertainties. The first two methods (Methods 1 and 2) are applied to all stations while Methods 3 and 4 are only applied to lakebed sites.

2. Accelerometric data

In 1962, three accelerometers were installed in Mexico City, two at the city centre and one at a hill zone site (*Ciudad Universitaria*, CU). Since 1964, station CU has recorded more than 30 earthquakes and has become the reference site to study ground motion in the Mexico City valley; since the seventies it yields digital recordings, and in the early nineties it has a broadband recorder. Table 1 shows the characteristics of the earthquakes used in this work and the strong motion data available at three stations in the city: CU, *Secretaría de Comunicaciones y Transportes* (SCT) and *Central de Abastos* (CD); SCT and CD are both at the lakebed zone. As shown in the table, the selected earthquakes cover a wide range of magnitudes ($6 < M_w < 8.1$) and distances to the rupture area ($280 < R < 530$ km); ✓ and x mean that the motion was well or poorly recorded at the station, respectively. Figure 2 shows the subduction seismic zones and the epicenters of the earthquakes shown in Table 1; it can be seen that the earthquakes included in this study cover also a wide range of sources and origins.

The 1985 *Michoacán* earthquake ($M_w=8.1$, event 10) is of particular importance due to its intensity and destructive effects. Other earthquakes originated in the same area are events 7 (25/10/81) and 12 (30/04/86), which were recorded mainly in CU. In the *Petatlán* zone, event 6 (14/03/79) was well recorded in CU and produced the collapse of two buildings in the *Universidad Iberoamericana* in Mexico City. The *Ometepec* seismic zone has the shortest return periods, and some examples are events 8 and 9 that occurred the same day (7/06/82). Event 13 (25/04/89) was very well recorded by all stations of the Guerrero and Mexico City networks and has been the strongest earthquake felt in Mexico City after the 1985 earthquake. Note in Fig. 2 the *Guerrero* seismic gap, where very little activity has been observed during the last 85 years: events 3 (07/06/76), 14 (31/05/90) and 26 (01/01/04). The *Jalisco* zone is capable of producing large earthquakes but it is very far from Mexico City, so the ground motion associated to this source is weak.

3. Computation of elastic response spectra at hill zone (CU)

The first attenuation law to estimate Fourier amplitude spectra at station CU, in the hill zone of Mexico City, was due to Castro *et al.* [1988]. Ordaz *et al.* [1994] improved the prediction using more data and a Bayesian regression approach: with the predicted Fourier amplitude spectra, the use of random vibration theory and an estimation of the duration of motion, it is possible to compute response spectra (Method 2). Using also a Bayesian approach, Reyes [1999] obtained directly attenuation laws for response spectra at CU (Method 1).

In what follows we compare these two methods using more recordings than were used in the original works. This has improved, on one hand, the reliability of the regressions for medium and small earthquakes which are more frequent but, on the other hand, the regressions fail to predict the spectra of large and very infrequent intense earthquakes. We have solved this by computing the frequency of earthquakes according to the magnitude (small, medium and large), assigning weights so large and small

earthquakes are equally represented in the regressions. The weights are inversely proportional to the number of earthquakes.

3.1. *Method 1: Bayesian regression of response spectra*

This is the most direct way of predicting response spectra using observed data. It consists on the use of a linear Bayesian regression [Ordaz *et al.*, 1994] using the following functional form:

$$\ln Sa_{CU}(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)(Mw - 6) + \alpha_3(T)\ln R + \alpha_4(T)R + \varepsilon(T) \quad (1)$$

where Sa_{CU} is the spectral acceleration at CU, T is the period of the one-degree-of-freedom system, R is the shortest distance to the rupture area, α_i are the coefficients to be estimated, Mw is moment magnitude and ε is the random estimation error, assumed to be normally distributed.

In the Bayesian approach, prior probability distributions of coefficients α_i are needed. They were obtained as reported by Reyes [Reyes, 1999]: an ω^2 model for the source, frequency-dependent attenuation parameters taken from Ordaz and Singh [1992], the duration of strong ground motion given by Reinoso and Ordaz [2001] and application of random vibration theory. These prior distributions are later updated using data of the recorded earthquakes, as shown by Ordaz *et al.* [1994]. Table 2 shows the coefficients obtained for the records of Table 1 which were computed with more data and, therefore, are more reliable than those published in previous works. Figure 3 shows a comparison of the exact response spectra (dark continuous line) with the spectra estimated with the Bayesian regression (discontinuous line) for the EW component of motion (results for the NS component are very similar). It can be seen that the estimates are acceptable for most of the events but for event 13 (for $1.0 < T < 3.7$ seconds), which was an anomalously intense earthquake for its magnitude and distance. Thin continuous lines in the plots correspond to results of Method 2, which is explained next. The parameter α_3 controls the geometrical spreading; in our study, $R > 287$ km, so surface waves predominate and the amplitude should attenuate as $(1/R)^{1/2}$, hence $\alpha_3 = -0.5$.

3.2. *Method 2: Bayesian regression of Fourier amplitude spectra and use of the random vibration theory*

Method 1 should be enough to compute response spectra at one station. However, as will be explained later, we have used in many applications Fourier amplitude spectra and random vibration theory (Method 2) to predict response spectra at lakebed zone sites based on the data recorded at CU; therefore, it is important to compare the uncertainties between Methods 1 and 2.

Using Method 2, the Fourier amplitude spectra (FAS) are estimated with a Bayesian technique and the following functional form:

$$\ln A(f) = \alpha_0(f) + \alpha_1(f)Mw + \alpha_2(f)\ln R + \alpha_3(f)R + \varepsilon(f) \quad (2)$$

where $A(f)$ is the ordinate of the FAS and f is frequency. In this case, the *a priori* information is taken from the work by Ordaz *et al.* [1994] who also used a ω^2 source model and the parameters of attenuation with distance given by Ordaz and Singh [1992].

After selecting reliable information in terms of the quality of the computed FAS, we analyzed 21 of the 26 earthquakes recorded at CU (Table 1). To estimate response spectra from the FAS, random vibration theory and the strong motion duration were used. To estimate this duration, D , we used the expression given by Reinoso and Ordaz [2001] that depends on magnitude, distance and site predominant period, T_s , for firm soil $T_s=0.5$ sec

$$D = 0.01 e^M + (0.036M - 0.07)R + (4.8M - 16)(T_s - 0.5) \quad (3)$$

The duration predicted by Eq. (3) corresponds to the difference in time between the instants where the 2.5 and the 97.5% of the Arias' intensity is present in the record due to long codas [Reinoso and Ordaz, 2001]. But this duration is too large when computing response spectra with the random vibration theory. We have found that multiplying D by a factor $F_D=0.5$ works fine for the spectra computed in this work.

Figure 3 shows, with thin continuous line, results of Method 2 compared with exact response spectra (dark continuous line) and the spectra estimated with Method 1 (discontinuous line). It can be seen that the estimates are also acceptable and similar to those of Method 1.

3.3. Comparison and computation of errors of Methods 1 and 2

In order to decide which of the two estimation methods so far presented is better, we have used two measures of misfit: the standard error, $\sigma(T)$, and the mean bias, $E(T)$, which have the following expressions:

$$E(T)_{RCR} = \frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_T} \ln \left(\frac{\hat{Y}(T)_j}{Y(T)_j} \right) \quad (4)$$

$$\sigma(T)_{RCR} = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_T} \ln^2 \left(\frac{Y(T)_j}{\hat{Y}(T)_j} \right)} \quad (5)$$

where N_T is the number of earthquakes, $Y(T)_j$ is the observed spectral value and $\hat{Y}(T)_j$ is the estimated value, both for event j and a given structural period. Note that a positive or negative sign of $E(T)$ implies, respectively, under or overestimation of the observed spectra.

Figure 4 shows E and σ for Method 1 (triangles) and Method 2 (circles) for both horizontal components of motion. The standard error is, for the NS component, around 8

per cent larger for Method 2, varying between 0.3 and 0.7 for both components. The average E is +0.03 and +0.02 for the NS and EW component, respectively, for Method 1, and 0.03 and -0.08 for the same components for Method 2, while average standard deviations for both components are 0.48 and 0.51 for Methods 1 and 2, respectively. This means that Method 1 is slightly more reliable than Method 2 for station CU, but differences are not that important. It can then be concluded that both methods can be used with the same degree of reliability.

4. Computation of response spectra at lakebed zones: sites SCT and CD

To compute response spectra at instrumented lakebed zone sites we can also use Methods 1 and 2, as was done in the previous section for CU. However, the availability of records for these stations is not that large, so less variation in terms of magnitude and distance can be included in the regressions. For this reason, two other methods are here considered: Method 3, that uses response spectral ratios between the site and CU [Rosenblueth and Arciniega, 1992; Arciniega *et al.*, 1993; Reyes, 1999] and Method 4 [Singh *et al.*, 1988; Ordaz *et al.*, 1994] which uses the Fourier amplitude spectra at CU, the empirical transfer functions recorded for other earthquakes at the site [Reinoso and Ordaz, 1999], and random vibration theory together with the duration of strong ground motion [Reinoso and Ordaz, 2001]. These last two methods do not need a complete set of records at the lakebed zone site but only a transfer function between this site and CU; however, it is expected that the uncertainties and the errors could be larger than Methods 1 and 2. Figure 1 shows a diagram which describes the methods.

In what follows, the comparison of the four methods is done for two accelerometric sites, SCT and CD, since they have been recording for the last 20 years many earthquakes, including the 1985 Michoacan event (Fig. 2 and Table 1).

4.1. Method 1: Bayesian regression of response spectra

For lakebed zone sites the same approach as CU was used with the addition, to obtain the *a priori* information for the Bayesian regression, of the analytical one-dimensional transfer function (Haskell method) obtained with available information of the site soil profiles (Fig. 1). Figure 5 shows the observed response spectra (dark continuous line) and the spectra obtained with Method 1 (discontinuous line) for stations SCT (Fig. 5a) and CD (Fig. 5b). It can be seen that apart from event 13 (an anomalously intense earthquake for its M and R) the estimations for SCT are very good. The thin continuous lines in the plots correspond to results of Method 2, which is explained next.

4.2. Method 2: Bayesian regression of Fourier amplitude spectra and use of the random vibration theory

In the same way as was done for the hill-zone station CU with the addition of the analytical transfer functions using the Haskell method, we obtained spectra for sites SCT and CD. Figure 5 shows the spectra obtained with Method 2 (thin continuous line) together with the observed response spectra (dark continuous line) and the spectra

obtained with Method 1 (discontinuous line). Again, it can be seen that apart from event 13 the estimations for SCT (Fig. 5a) are very good. However, for CD (Fig. 5b), differences between Method 2 and the observed spectra are larger than differences for Method 1. For small events ($M < 7.0$) the spectral ordinates are underestimated while for large magnitude ($M > 7.0$) the estimation for short periods is very good but spectral ordinates are generally overestimated for long period.

Although it has not been widely recognized, there are some observations pointing out to the existence of nonlinear behavior at some sites in Mexico City like CD. Contrary to what has been published (e.g. Atkinson and Boore, 2003) that non linear behavior affect mainly short periods, site CD exhibit an anomalous small amplitude during intense earthquakes for large period ($T > 1$ sec) and a consistent change in the dominant period from 3.3 sec (during weak motion) up to 4 sec (during earthquakes like event 10, September 1985, $M 8.1$); moreover, the second soil mode clearly moves from 1.25 to 1.33 sec. These non linear changes are very clear in the response spectra, but may be unnoticed in the Fourier amplitude spectra due to the presence of many peaks or to smoothing. This is why method 1 is better than method 2 since the regression captures directly the effects mentioned above.

4.3. Method 3: Bayesian regression of response spectra at CU and response spectra site transfer function

With the response spectra computed for CU as was shown for Method 1, we obtain response spectra at a lakebed zone site multiplying the spectra at CU by the average response spectra site transfer function [Rosenblueth and Arciniega, 1992] previously computed for as many earthquakes as possible. Although these approach is absolutely empirical since response spectra transfer functions do not have a physical meaning, it is straight, fast and seems to work fine (Fig. 1).

Figure 6 shows the spectra obtained with Method 3 (thin continuous line) together with the observed response spectra (dark continuous line) and the spectra obtained with Method 4 (discontinuous line). Again, it can be seen that apart from event 13 the estimations for SCT (Fig. 6a) are very good. For station CD results for events 10 and 11 are very bad. This is because the average response spectra site transfer function can not explicitly take into account the effect of the non linear behavior referred above.

4.4. Method 4: Bayesian regression of FAS at CU, empirical site transfer function and random vibration theory

Based on the procedure proposed by Ordaz *et al.* [1994], Method 4 consists on the computation of the Fourier amplitude spectra at the lakebed zone (SCT and CD) as the product of the Fourier amplitude spectra at CU and the empirical Fourier transfer function between CU and the site [Reinoso and Ordaz, 1999]. To obtain response spectra, the duration of strong ground motion and the random vibration theory were employed (Fig. 1). The advantage of this method is that every step has a physical meaning and can

be improved and analyzed separately. For instance, the empirical transfer functions clearly exhibit the non linear behavior and with Method 4, it is possible to consider this non linear behavior based on the intensity of the earthquake [Reinoso and Ordaz, 1999]. Results for this method are shown in Fig. 6 with discontinuous line. It can be observed that most predictions are similar to Method 3, but for event 10 (The 1985 earthquake) Method 4 yields much better results.

4.5. Comparison and computation of errors

We have computed the errors obtaining the accumulated error in percent, $E(T)$, and the standard deviation for every structural period, $\sigma(T)$, using Eqs. (4) and (5). Figure 7 shows E and σ for station SCT with Method 1 (triangles), Method 2 (circles), Method 3 (discontinuous line) and Method 4 (continuous line) for both horizontal components of motion. Table 3 shows the average errors and average standard deviations. From Figure 7 it can be seen that Method 4 has the largest errors at the dominant period of the site (2 sec); average errors show an overestimation of 6 and 8 per cent for Methods 3 and 4 (EW component), respectively, and an underestimation of 8 per cent for Method 1. Standard deviations are similar for all methods for the NS component; for the EW one, Method 3 show larger deviations for periods between 2.5 and 3.5 sec. Average standard deviations are smaller for Method 1 compared to the other three for the NS component, while Method 3 shows the largest deviations for the EW component.

Figure 8 shows results for station CD. It can be seen that Method 1 is by far the method with the smallest errors and deviations. This is due to the fact that response spectra data set is relatively small, and the variations between them are smooth, so the prediction in terms of a direct regression works fine. Method 2 yields the largest errors and deviations. This is because the Fourier Amplitude spectra have little changes in the form that are very difficult to catch by the regressions but are very important in the response spectra shape. Methods 3 and 4 yield very similar errors and standard deviations.

5. Discussion and conclusions

We have presented four different methods to obtain future response spectra given the magnitude and the distance to the rupture area based on accelerometric data. These methods have been used in many applications including the computation of the design spectra included in the code and many studies regarding seismic risk at many sites. All methods have advantages and disadvantages, and to understand and compute their errors and uncertainties is very important for the future use of them.

From the results presented here, Method 1, the direct Bayesian regression of response spectra, is the best choice since it has shown the smallest errors and deviations. The problem with Method 1 is that it needs a wide set of records (response spectra) to be reliable, and this is not the case for most sites. Actually, it is only true for the sites presented in this work (CU, SCT and CD); for any other site Method 1 simply can not be applied.

Method 2 is based on Fourier amplitude spectra and the use of the random vibration theory together with the strong motion duration, a step that introduces approximations that may reduce its reliability. Standard deviations computed for this method are usually the largest.

For the lakebed zone, the lack of data for most places makes Methods 1 and 2 almost useless. This is why Methods 3 and 4, which rely on the data observed at the reference station (CU), need to be employed. Method 3, which is based on the response spectra at CU and the use of response spectra ratios, is better than Method 4 where the use of the random vibration theory and the duration of the strong ground motion introduce uncertainties and errors. Of course, this is provided that non linear behavior does not occur in the Mexico City soil, which is still to be confirmed by future records.

For any practical evaluation of the seismic hazard in terms of response spectra one has to compute it for a non instrumented site, and the interpolation comes to the discussion, especially in a place such as Mexico City with a lakebed zone that changes its response characteristics within a few dozens of meters. This is the case of the seismic code or the computation of maps of risk or hazard, or any individual study of site specific response spectra. From the results presented in this work it is clear that using Method 3 for all instrumented sites and then interpolating these spectra is the best way to obtain the response spectra at the desired site.

Acknowledgements

The first author gratefully acknowledges the financial support of the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACyT).

References

- Arciniega, A., M. Ordaz, Padilla G., Pérez Rocha L. E. and Rosenblueth E. [1993]. "Predicción de espectros de respuesta en el valle de México. Métodos simplificados y aplicaciones," *Report FJBS/CIS-93/04, Centro de Investigación Sísmica A. C., Fundación Javier Barros Sierra*.
- Atkinson, G. and Boore, D. [2003]. "Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, 1703-1729.
- Cartwright, D. and Longuet-Higgins, M. [1956]. "The statistical distribution of the maxima of a random function," *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A 237, 212-232
- Castro, R., Singh, S. K. and Mena, E. [1988]. "An empirical model to predict Fourier amplitude spectra of horizontal ground motion," *Earthquake Spectra*, 4, 675-686.
- Joyner, W. and Boore, D. [1993]. "Methods for regression analysis of strong-motion data", *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 469-487.
- Molas, G. and Yamazaki, F. [1995]. "Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events," *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1343-1358.
- Ordaz, M. and Reinoso, E. [1987]. "Uso de la teoría de vibraciones aleatorias en la determinación de los espectros de diseño del reglamento para las construcciones del Distrito federal," *Memorias del VII Con. Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro Qro., México*, A155-A167.
- Ordaz M. and Singh, S. K. [1992]. "Source spectral and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City," *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 24-43.

- Ordaz, M., Singh, S. K. and Arciniega, A. [1994]. "Bayesian attenuation regressions: an application to Mexico City," *Geophysical Journal International*, Vol. 117, No. 1, 335-344.
- Reinoso, E., Pérez-Rocha, L., Ordaz, M. and Arciniega, A. [1992]. "Prediction of response spectra at any site in Mexico City," *Proceedings of the Tenth World Conference of Earthquake Engineering*, 767-772.
- Reinoso E. and Ordaz, M. [1999]. "Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings," *Earthquake Spectra*, 15, No. 2, 273-295.
- Reinoso E. and Ordaz M. [2001]. "Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 653-673.
- Reyes, C. [1999]. "El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios," *Ph.D. Thesis*, UNAM, México.
- Rosenblueth, E. and Arciniega, A. [1992]. "Response spectral ratios," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, 483-492.
- Singh, S. K., Mena, E., and Castro, R. [1988]. "Some aspects of source characteristics and the ground motions amplifications and near Mexico City from the acceleration data of the September, 1985, Michoacán, Mexico earthquakes", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 451-477.
- Udwadia, F. and Trifunac, M. [1974]. "Characterization of response spectra through the statistic of oscillator response," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 64, No. 1, 205-219.

Table 1. Subduction earthquakes (thrust-faulting mechanism) with $M \geq 6$ recorded by three digital accelerometric stations in Mexico City

ID	Date	Gap	M	Lat.	Long.	Depth	Distance-CU	Azim.-CU	CU	SCT	CD
1	23/08/65	Oax. Este	7.8	16.28	96.02	16	466	135	✓	-	-
2	02/08/68	Oax. Oeste	7.4	16.25	98.08	33	326	160	x	-	-
3	07/06/76	Guerrero	6.4	17.45	100.65	48	292	215	✓	-	-
4	19/03/78	San Marcos	6.4	16.85	99.9	16	285	200	✓	-	-
5	29/11/78	Oaxaca	7.8	16.00	96.69	19	414	140	✓	-	-
6	14/03/79	Petatlán	7.6	17.46	101.46	20	287	230	✓	-	-
7	25/10/81	Michoacán	7.3	17.75	102.25	20	330	237	✓	-	-
8	07/06/82	Ometepec	6.9	16.35	98.37	15	304	165	✓	-	-
9	07/06/82	Ometepec	7.0	16.35	98.37	15	303	165	✓	-	-
10	19/09/85	Michoacán	8.1	18.14	102.71	15	295	255	✓	✓	✓
11	21/09/85	Petatlán	7.6	17.62	101.82	15	318	240	✓	-	✓
12	30/04/86	Michoacán	7.0	18.42	102.99	16	409	255	✓	-	X
13	25/04/89	Ometepec	6.9	16.60	99.40	19	290	185	✓	✓	✓
14	31/05/90	Guerrero	6.1	17.15	100.85	21	304	210	✓	✓	✓
15	15/05/93	Ometepec	6.0	16.47	98.72	20	320	170	x	-	✓
16	24/10/93	Ometepec	6.7	16.50	99.00	19	310	170	✓	✓	✓
17	10/12/94	Petatlán	6.6	18.02	101.56	20	300	170	✓	✓	✓
18	14/09/95	Ometepec	7.3	16.31	98.88	45	320	160	✓	✓	✓
19	09/10/95	Jalisco	8.0	18.85	104.53	27	530	260	x	x	✓
20	25/02/96	Oaxaca	7.1	15.83	98.25	15	380	180	-	x	X
21	15/07/96	Petatlán	6.6	17.40	101.10	20	301	230	✓	x	-
22	19/07/97	Ometepec	6.7	15.86	98.35	15	394	170	x	x	X
23	03/02/98	Oaxaca	6.3	15.69	96.37	33	509	138	✓	✓	X
24	09/08/00	Michoacán	6.5	18.13	102.39	33	380	240	✓	x	✓
25	22/01/03	Colima	7.5	18.86	103.90	26	526	256	✓	✓	✓
26	01/01/04	Guerrero	6.0	17.45	101.40	15	323	228	✓	✓	-

Table 2. Values of $\alpha_i(T)$ obtained for CU (EW component), Method 1

T	α_1	α_2	α_3	α_4
0.0	5.6897	1.1178	-0.50	-0.0060
0.2	6.5911	0.8874	-0.50	-0.0067
0.4	6.3144	1.0139	-0.50	-0.0059
0.6	6.6483	1.1018	-0.50	-0.0065
0.8	6.8495	1.3343	-0.50	-0.0076
1	6.4316	1.3155	-0.50	-0.0064
1.2	6.7093	1.3152	-0.50	-0.0072
1.4	6.0035	1.2168	-0.50	-0.0050
1.6	6.0507	1.2437	-0.50	-0.0051
1.8	5.6822	1.3034	-0.50	-0.0046
2	5.7883	1.3993	-0.50	-0.0056
2.2	5.5195	1.6160	-0.50	-0.0058
2.4	5.1604	1.4749	-0.50	-0.0048
2.6	5.4283	1.6010	-0.50	-0.0061
2.8	5.0573	1.4965	-0.50	-0.0049
3	4.5972	1.4695	-0.50	-0.0039

T	α_1	α_2	α_3	α_4
3.2	4.4303	1.5104	-0.50	-0.0038
3.4	4.0981	1.5027	-0.50	-0.0031
3.6	3.7992	1.6018	-0.50	-0.0029
3.8	3.5164	1.7014	-0.50	-0.0029
4	3.2601	1.7098	-0.50	-0.0024
4.2	3.0349	1.6404	-0.50	-0.0020
4.4	2.9353	1.6219	-0.50	-0.0019
4.6	2.7737	1.5579	-0.50	-0.0016
4.8	2.6416	1.5223	-0.50	-0.0015
5	2.6246	1.5194	-0.50	-0.0018
5.2	2.4099	1.4851	-0.50	-0.0014
5.4	2.1372	1.4635	-0.50	-0.0008
5.6	2.0505	1.5243	-0.50	-0.0010
5.8	2.2973	1.6494	-0.50	-0.0022
6	2.6207	1.7533	-0.50	-0.0035

Table 3. Average errors and standard deviations of spectra computed at sites SCT and CD

METHOD	SCT				CD			
	NS		EW		NS		EW	
	E	σ	E	σ	E	σ	E	σ
1	+0.02	0.13	+0.0	0.07	+0.04	0.14	0.0	0.17
2	0.01	0.17	+0.01	0.10	+0.16	0.24	+0.21	0.34
3	-0.03	0.26	-0.08	0.17	+0.03	0.28	+0.04	0.36
4	-0.05	0.17	-0.12	0.10	+0.20	0.25	+0.14	0.34

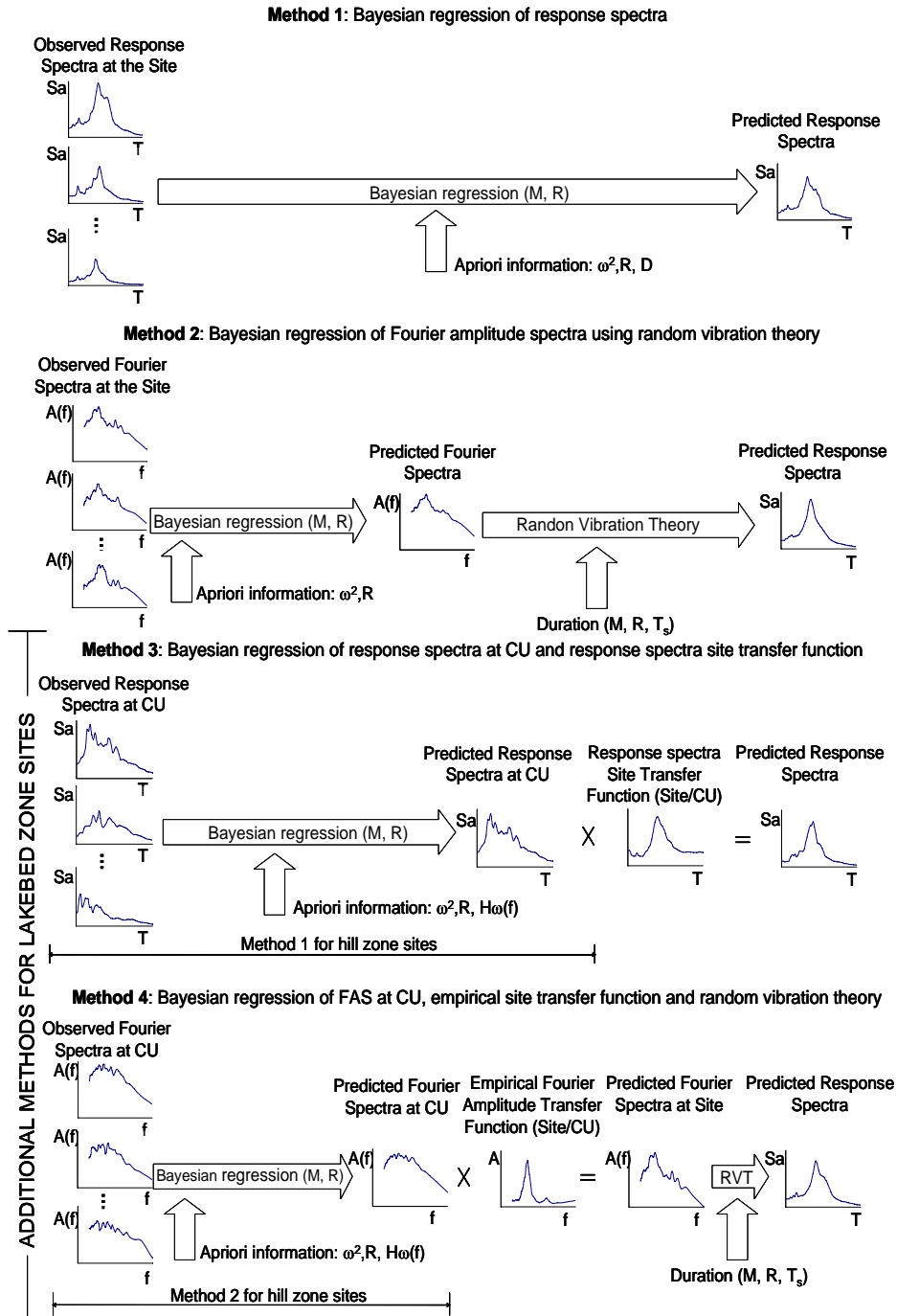


Fig. 1. Simplified diagram of the methods used in this work for the calculation of response spectra. The plots correspond to the SCT site but the methodology was applied to CD and CU sites (the latter only with methods 1 and 2)

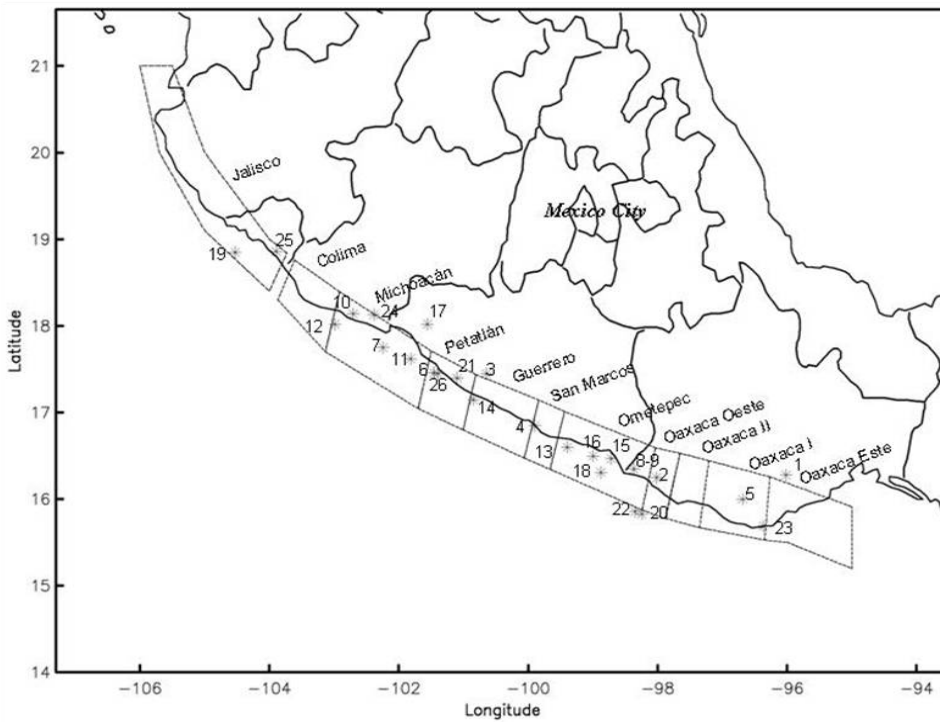


Fig. 2. Seismotectonic subduction zones and epicenters of earthquakes used in this study

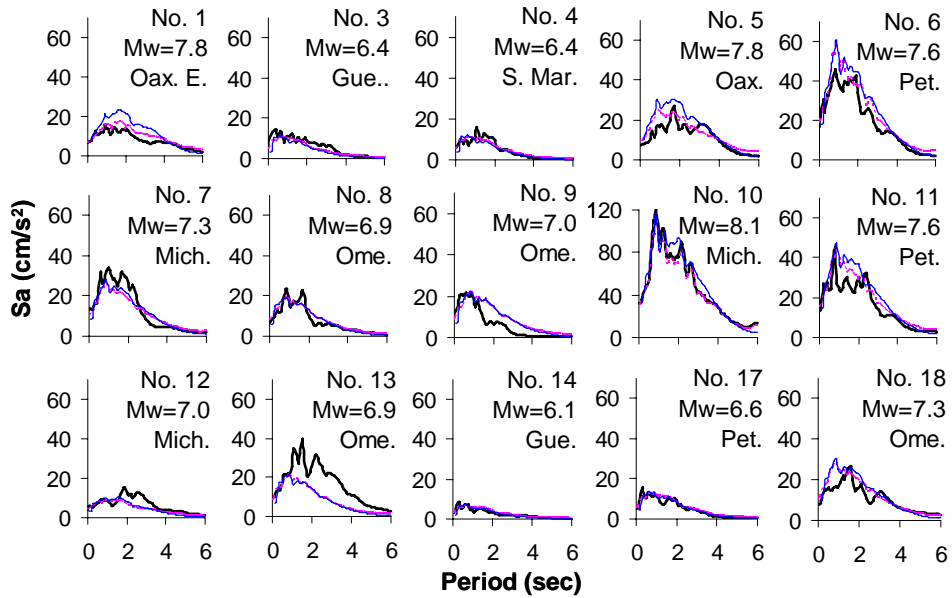


Fig. 3. Response spectra at station CU for the EW horizontal component (results for the NS component are very similar): exact spectra (dark continuous line), spectra obtained with the regression of response spectra or Method 1 (discontinuous line), and spectra obtained with the regression of FAS and the random vibration theory or Method 2 (thin continuous line)

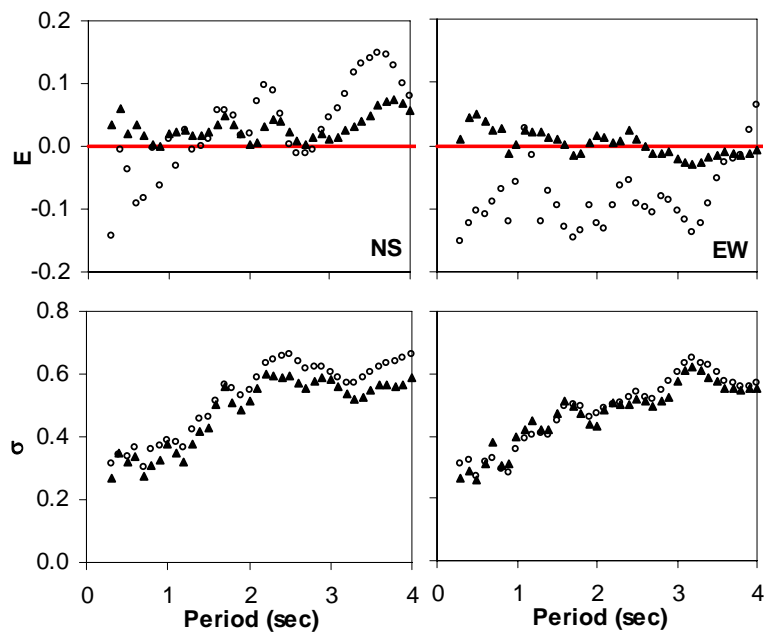


Fig. 4. Error and standard deviation for CU station at hill zone for Method 1 (triangles) and Method 2 (circles)

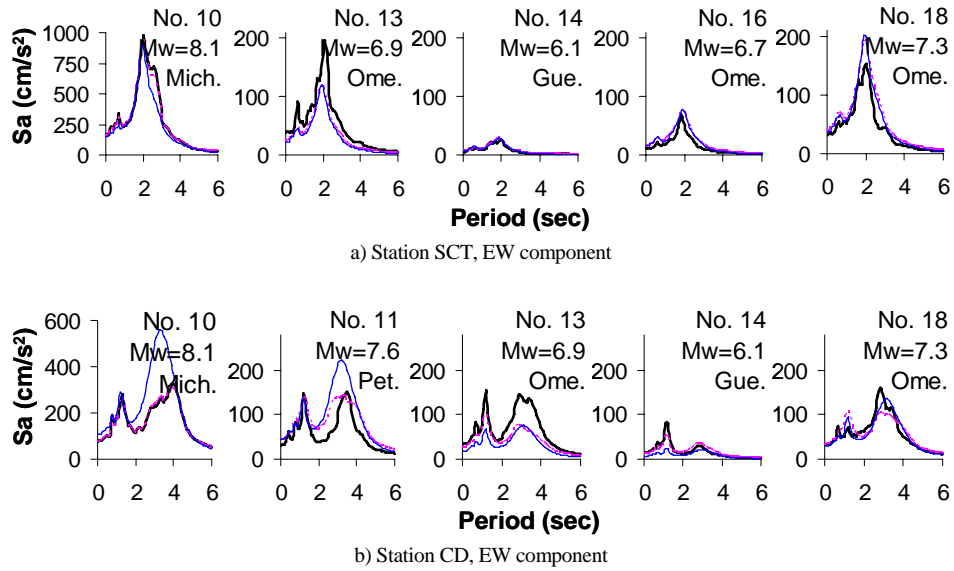


Fig. 5. Observed response spectra (dark continuous line) vs. response spectra obtained with the regression of the response spectra or Method 1 (discontinuous line) and with the regression of Fourier amplitude spectra using the RVT or Method 2 (thin continuous line)

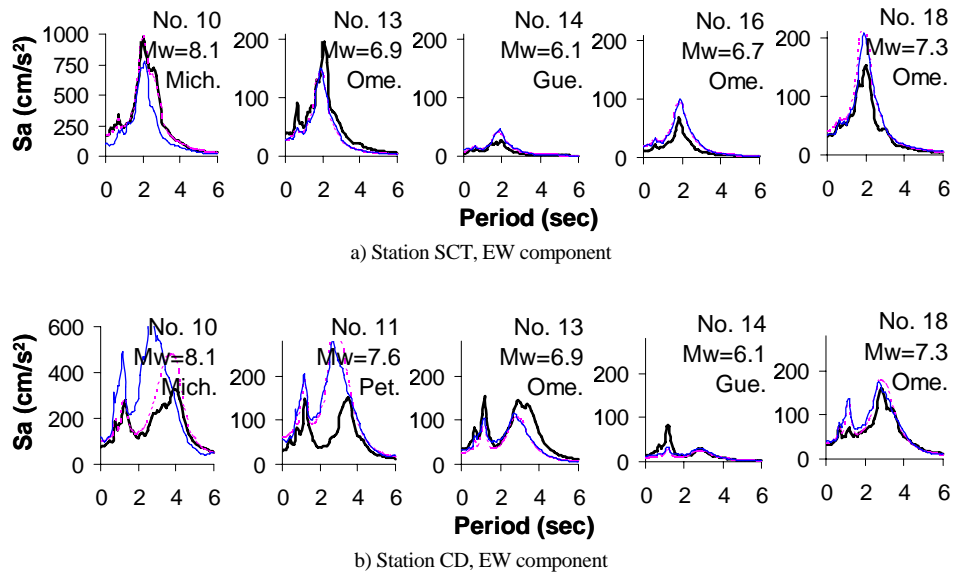


Fig. 6. Observed response spectra (dark continuous line) vs. response spectra obtained with the regression of the response spectra at CU multiplied by the response spectra transfer function or Method 3 (thin continuous line) and with the regression of Fourier amplitude spectra at CU multiplied by the empirical Fourier transfer function and the use of the RVT or Method 4 (discontinuous line)

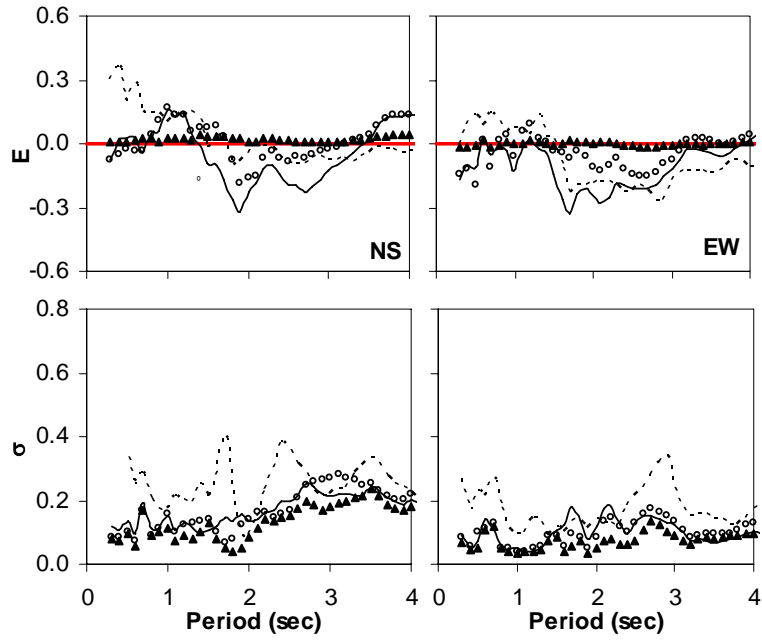


Fig. 7. Error and standard deviation for SCT station for Method 1 (triangles), Method 2 (circles), Method 3 (discontinuous line) and Method 4 (continuous line)

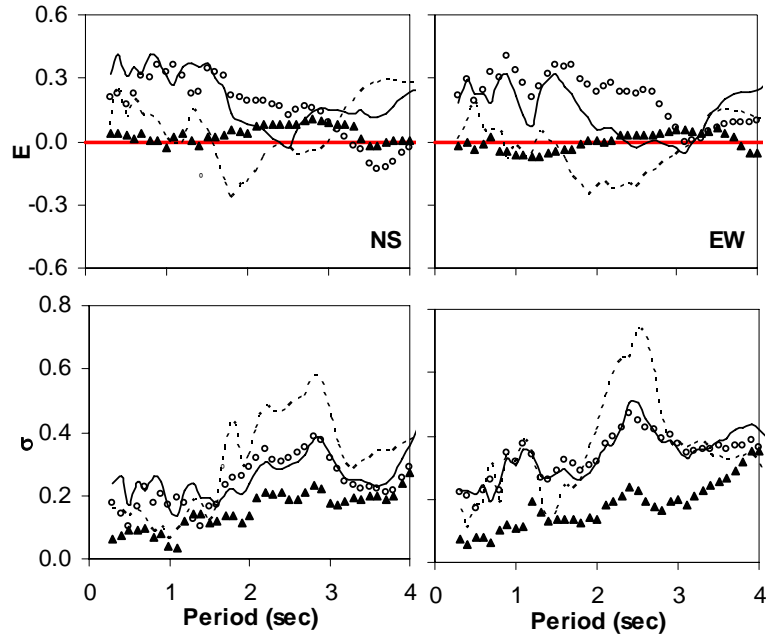


Fig. 8. Error and standard deviation for CD station for Method 1 (triangles), Method 2 (circles), Method 3 (discontinuous line) and Method 4 (continuous line)

EMPIRICAL GREEN'S FUNCTIONS MODIFIED BY ATTENUATION FOR SOURCES LOCATED AT INTERMEDIATE AND FAR DISTANCES FROM THE ORIGINAL SOURCE

MIGUEL A. JAIMES, EDUARDO REINOSO AND MARIO ORDAZ*

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán 04510, México, DF.

mjaimest@iingen.unam.mx, ere@pumas.iingen.unam.mx, mors@pumas.iingen.unam.mx

Received (received date)

Revised (revised date)

Accepted (accepted date)

We present a scheme to modify empirical Green's functions by attenuation considering: (1) geometrical spreading, (2) decay in high frequency, (3) regional attenuation and (4) phase of the signal. The accelerograms computed with the proposed simulation method are compared, in time and frequency domains, with strong ground motions from subduction and intermediate-depth earthquakes recorded in Mexico. It is shown that this simple empirical Green's functions technique can synthesize both the shape and amplitude of the response spectra in the site, considering a postulated seismic source located at different distances from the original one.

Keywords: Subduction, intermediate depth, Mexico City, strong ground motion, attenuation, empirical Green's functions

1. Introduction

Many earthquake engineering problems, such as the design of important structures, require the use of accelerograms for nonlinear analysis. One possible way to obtain strong ground motions due to expected future large events is the use of the empirical Green's functions technique. Its basic idea is to use records of small magnitude events as approximations of the Green's functions, and convolve them using suitable earthquake scaling laws in order to simulate seismic motions that correspond to large magnitude events [Hartzell, 1978]. In this way, it is possible to take into account local conditions in the recorded site, as well as propagation effects between source and receiver. Different schemes of this technique have been proposed to simulate the rupture process of an earthquake [Irikura, 1983; Joyner and Boore, 1986; Boatwright, 1988; Wennerberg, 1990; Kanamori *et al.*, 1993; Zeng *et al.*, 1994; Tumarking *et al.*, 1994; Hutchings, 1994a; Ordaz *et al.*, 1995]. The Green's functions technique does not take into account non-linear soil effects, but it is possible to incorporate them with geotechnical non-linear analysis [Heuze *et al.*, 1997; Nozu and Morikawa, 2004].

The technique has also been validated by computing ground motion time histories of important earthquakes such as San Fernando [Hutchings, 1994b], Loma Prieta [Hutchings, 1991; Jarpe and Kasameyer, 1996] and Northridge [Hartzell *et al.*, 1999, 2005], and for the prediction of future events [Hutchings *et al.*, 1996].

However, the method based on empirical Green's functions presents one important limitation: it is not applicable to cases with source-to-site distances different from those for which the Green's function is available. This is a strong limitation for most practical purposes since a recorded earthquake at the site, for the desired distance and of the appropriate magnitude, is not available. This is the case, for example, when it is required that the acceleration time histories to be used in a seismic design must be consistent with a seismic scenario defined, for instance, in terms of the maximum credible earthquake located at a given distance. Previous works [*e.g.* Kamae *et al.* 1998, Pitarka *et al.* 2000] proposed a hybrid technique to simulate near-fault ground motion, which combines deterministic and stochastic approaches to generate synthetic Green's functions for regions where the absence of small-magnitude events records precludes the application of the empirical Green's functions method. However, it is of great practical interest to obtain acceleration time histories for sites located at several hundred of kilometers from the earthquake source. For near source stations more parameters are needed to represent the physics of the source [Bour and Cara, 1997] but for stations far away from the source such effects could be considered insignificant or null for practical purposes.

In this work, we show that it is possible to use a record as empirical Green's function given its magnitude, M_R , and its distance, R_R , to simulate a seismic event with larger magnitude, M_S , and at a distance, R_S , different to that of the recorded one, but located in the same seismic region. Figure 1 shows a diagram describing the method used in this work. The function is modified by four parameters: geometrical spreading, decay in high frequency, regional attenuation and phase of the signal. Some correction factors have been proposed that combine methods for calculating the high-frequency part of the Green's functions [*e.g.* Kamae *et al.* 1998, Pitarka *et al.* 2000]. Pitarka *et al.* [2000] simulate high-frequency ground motion ($f > 1$ Hz) from a hypothetical small event located in the fault plane of the target earthquake using the stochastic simulation technique of Boore [1983]. We use the Green's functions technique [Ordaz *et al.* 1995] together with a proposed expression to obtain time histories with source-to-site distance and magnitude different from those associated to the recorded Green's function. Mexican data corresponding to thrust- and normal-faulting mechanisms are used. The records and their corresponding spectra obtained with the expressions proposed in this work are compared with recorded strong ground motions in Mexico City, including firm and lakebed sites.

2. Empirical Green's functions modified by attenuation

An earthquake of small magnitude recorded in the site of interest will be regarded as an empirical Green's function. This record must present similar characteristics of a large earthquake and must be representative of the seismic source and fault mechanism of interest

(e.g. thrust-faulting or normal-faulting mechanism). We use a far-field point-source spectral model of the Fourier acceleration spectrum [Boore, 1983]:

$$A(\omega) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot F \cdot S}{4\pi\rho\beta^3} \frac{S(\omega)}{R} \cdot \exp\left(-\frac{\omega k}{2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{R}{Q\beta} \left[\frac{\omega}{2} - \frac{i\omega}{\pi} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_{Nq}}\right)\right]\right] \quad (1)$$

where ω is frequency, $R_{\theta\phi}$ is the radiation pattern, F is the effect of the free surface, S represents the partition of total shear-wave energy into horizontal components, $S(\omega)$ is the source spectrum, β is the velocity of propagation of shear waves, ρ is the mass density of the crust, R is focal distance and k is a factor that depends on the observation site, [Singh *et al.*, 1982] that explains the spectral decay at high frequencies; we will take $k = k_o + R/Q_1$, where k_o and Q_1 depend on the geological characteristics of the site. Q is the quality factor, given by $Q = Q_o (\omega/2\pi)^\varepsilon$, where Q_o and ε are constants for a portion of the Earth's crust, and ω_{Nq} is the Nyquist frequency.

The geometrical attenuation is given by $1/R$, which corresponds to body waves in the far-field. The term containing κ considers that the Fourier acceleration spectrum at high frequency decays faster than due to the regional attenuation [Singh *et al.* 1982; Anderson and Hough, 1984]. Finally, the term containing Q takes into account the regional attenuation due to the energy dissipated by viscous processes; notice that this term has a complex part that affects the phase of the signal [Futterman, 1962].

If we assume that site effects at the recording site and at the new site are the same, then, in order to modify the Green's function for a distance different to the original one, its spectrum has to be multiplied by the theoretical ratio between the spectra of the modified Green's function and that of recorded event:

$$F_c(\omega) = \frac{A_M(\omega)}{A_R(\omega)} \quad (2)$$

where sub-indexes R and M stand for recorded and modified empirical Green's functions, respectively.

Substituting ec. (1) into ec. (2) we obtain the factor that modifies the Green's function at a distance different to the recorded accelerogram:

$$F_c(\omega) = \frac{R_R}{R_M} \left[\exp\left(\frac{-\omega \cdot (k_M - k_R)}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-\omega \cdot (R_M - R_R)}{2Q\beta} + \frac{i\omega \cdot (R_M - R_R) \cdot \ln(\omega/\omega_{Nq})}{Q\beta\pi}\right) \right] \quad (3)$$

Therefore, the Fourier transform of the accelerogram modified by attenuation, $A_M(\omega)$, is obtained as the product of the Fourier transform of the accelerogram used as Green's function, $A_R(\omega)$, and the factor $F_c(\omega)$ given in equation 3. The inverse Fourier transform of $A_M(\omega)$ will then be the empirical Green's function modified by attenuation effects, $a_M(t)$. Note that the factor $F_c(\omega)$ simply adds far-field S-waves; this fails to reconstruct the low frequency part of the records at distances comparable with source dimensions [Bour and Cara, 1997]. To generate near source strong ground motions, which is not the goal of this work, other alternatives should be used.

Figure 2 shows an example of the application of ec. (3). In this figure we show an acceleration time history used as Green's function which corresponds to an event recorded at a distance of 300 km, and the Green's functions modified by attenuation for distances of 250 and 350 km. The values of $\beta=3.5$ km/sec, $Q_o = 273$, $\varepsilon = 0.66$, $k_o=0.036$ sec and $Q_I=1500$ km were used [Singh *et al.* 1982; Ordaz and Singh, 1992]. We also plot the Fourier spectrum of each time history.

In what follows three examples are presented to test the proposed scheme. Table 1 gives the seismological parameters of the earthquakes used in this work. Table 2 shows the stations used in this work and the strong motion data available. As shown in Table 2, the selected stations cover a wide range of distances to the rupture area ($28 < R < 320$ km), including stations outside and inside Mexico City; the symbol \checkmark means that the respective record was used. Figure 3 shows the location of stations, epicenters and rupture areas of events listed in Table 2. Although results were obtained for all stations of Table 2, in what follows we will show results for the three most representative earthquakes.

3. Michoacán, 19 September 1985, subduction earthquake

We use strong ground motion records (EW component) produced by the 19 September 1985 earthquake ($M=8.1$) as target event, and the record of 21 September 1985 earthquake ($M=7.6$) as empirical Green's function. Such Green's functions are modified by attenuation to the distance of the target event (ec. 3 and Table 2) using parameters shown in Table 1; with these new time histories and the Green's function technique [Ordaz *et al.* 1995], we obtain strong ground motions corresponding to the target event. Figure 4 shows data and simulations, including acceleration time histories, as well as observed and calculated Fourier and response spectra. Results correspond to three accelerometric stations. These stations are located close, at a medium distance and far from the rupture area (AZIH, COYC and VI, respectively). The simulated time histories are in reasonable agreement with the observed records for intermediate (Fig. 4b) and long distances (Fig. 4c); however, for near source stations with distances comparable to the source dimensions, results are not acceptable (Station AZIH, Fig. 4a). This is because radiation patterns and source heterogeneity, which are not taken into account in this work, causes spatial variations in ground motion around the fault [Somerville *et al.* 1997]. On the right hand side Figure 4 compares the observed response spectra (solid lines) for the 19 September event with the corresponding simulated response spectra (dashed lines). The latter have been computed

averaging the spectra of many Green's functions simulations. Apart from station AZIH which was explained above, it can be said that the estimations for the target event are good.

4. Petatlán, 14 September 1995, M 7.4 subduction earthquake

We use recorded ground motions of the 24 October 1993 earthquake ($M=6.7$, $Mo_R=1.20 \times 10^{26}$ dyne-cm and $\Delta\sigma_R=10$ bar; see Table 1) as empirical Green's functions and the record of 14 September 1995 earthquake as target event. This earthquake was recorded at many stations (Table 2, Fig. 3). The seismic moment of the target event is $Mo_S=1.11 \times 10^{27}$ dyne-cm. The stress drop $\Delta\sigma_S=16$ bar was found by plotting the average spectral ratio of the target event divided by the event used as Green's functions for all stations, fitting it to the spectral ratio predicted by an ω^2 model [Ordaz *et al.* 1995]. Figure 5 shows a comparison for three stations (COPL, MEZC and SCT) of the data observed and calculated, including acceleration time histories and Fourier and response spectra. Again, apart from the near-to-source station COPL (Figure 5a), the simulated time histories, Fourier and response spectra are in reasonably good agreement with the observed records.

5. 23 May 1994, intermediate depth earthquake

There are evidences that source and wave propagation characteristics of intermediate depth events are different of subduction events [*e.g.* Furumura and Singh, 2002; Garcia *et al.* 2004]. This is why it is important to prove that the proposed method is applicable to both types of earthquakes.

The target event, 23 May 1994 with M 6.2 (Table 1) earthquake, was selected because it was recorded at many stations (Table 2, Fig. 3). We use strong ground motion records of the 20 April 1998 earthquake (M 5.9, Table 1) earthquake as empirical Green's functions; although magnitudes are similar, we have chosen this earthquake because it is the best recorded in the catalog. Figure 6 shows acceleration time histories and simulated Fourier and response spectra. Results correspond to a station relatively near to the source (ZIIG) and at an intermediate and far distances from the epicenter (CUER and CU, respectively); in this case, the difference between stations CUER and CU is not only the distance but the fact that records at CU exhibit an anomalous significant amplification around 0.5 Hz probably because it is located over large volcanic deposits (The Mexican Volcanic Belt) and CUER is just outside this area. Little differences in the observed and synthesized traces can be noticed. It is clear that the method is reliable and that the 20 April event works as an excellent Green's function for event 23 May 1994.

6. Conclusions

We present an expression to modify an empirical Green's function by attenuation effects, for sites located at intermediate or far from the seismic source considering (1) geometrical spreading, (2) decay in high frequency, (3) regional attenuation and (4) phase of the signal. The intensities computed with the method of simulation are compared with subduction (thrust-faulting mechanism) and intermediate depth (normal-faulting mechanism) earthquakes. The method shows a good agreement between observed and

synthesized motions for stations located at intermediate distances and far from the source; however, for stations near the source or distances comparable with the source dimensions the method loses accuracy due to radiation patterns and source heterogeneity; for these cases, other alternatives should be used.

Ground motion estimations using the proposed simulation scheme are not free of uncertainties. These uncertainties, as it is well known, are one of the key factors for probabilistic seismic hazard estimation. Within the proposed simulation scheme, we are assuming that attenuation with distance is deterministic, as well as site effects, because they are implicit in the recording used as Green's function. Uncertainty due to the source, however, could be investigated by quantifying the variability of ground motion parameters from one simulation to the other for a fixed stress drop. This quantification of uncertainty, even if partial, could give clues to know what portion of the aleatory variability could be attributed to details of the rupture process.

Acknowledgements

The first author gratefully acknowledges the financial support of CONACyT.

References

- Anderson, J. K. and S. E. Hough [1984] "A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies", *Bull. Seism. Soc. Am.* 74, 1969-1994.
- Boatwright, J. [1988] "The seismic radiation from composite models of faultings", *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 489-508.
- Boore, D. M. [1983] "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1865-1894.
- Bour, M. and Cara M. [1997] "Test of a simple empirical Green's function method on moderate-sized earthquakes", *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 3, 668-683.
- Futterman, W. I. [1962] "Dispersive body waves", *Journal Geophys. Res.* 73, 3917-3935.
- Furumura, T. and Singh. S. K. [2002] "Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes: The attenuation functions for interplate and in-slab events", *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 2210-2125.
- García, D. Singh S. K., Herráiz M., Pacheco J. F. and Ordaz M. [2004] "In-slab earthquakes of Central Mexico: Q, source spectra and stress Drop", *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, 3.
- Hartzell, S. [1978]. "Earthquake aftershocks as Green's functions", *Geophys. Res. Lett.*, 5, 1-4.
- Hartzell, S., Harmsen S., Frankel A. and Larsen S. [1999] "Calculation of broadband time histories of ground motion; comparison of methods and validation using ground motion from the 1994 Northridge earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1484-1504.
- Hartzell, S., Guatteri M., Mai M. M., Liu P. C. and Fisk M. [2005] "Calculation of broadband time histories of ground motion, part II: kinematic and dynamic modeling using theoretical Green's function and comparison with the 1994 Northridge earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, 614-645.
- Heuze, F., Ueng T., Hutchings L., Jarpe P. and Kasameyer [1997] "A coupled seismic-geotechnical approach to site-specific strong motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16, 259-272.
- Hutchings, L. [1991] "Prediction of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, 1813-1837.

- Hutchings, L. [1994a] "Kinematic earthquake models and synthesized ground motion using empirical Green's functions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1028-1050
- Hutchings, L. [1994b] "Earthquake models and synthesized ground motion for the 1971 San Fernando earthquake and aftershocks using empirical Green's functions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1028-1050.
- Hutchings, L., Jarpe, S.P., Kasameyer, P.W. and Foxall W. [1996] "Synthetic strong ground motions for engineering design utilizing empirical Green's functions", *Eleven World conference of earthquake Engineering*, Acapulco, June 23-28.
- Irikura, K. [1983] "Semi-empirical estimation of ground motion during large earthquakes", *Bull. Disaster. Prevention. Inst.*, Kyoto Univ. 33, 63-104.
- Jarpe, S. P. and Kasameyer P. W. [1996] "Validation of procedure for calculating broadband strong-motion time histories with empirical Green's functions", *Bull Seism. Soc. Am.* 86, 1116-1129.
- Joyner, W. B. and Boore D. M. [1986] "On simulation large earthquakes by Green's functions addition of smaller earthquakes, in Earthquake Source Mechanics", (Maurice Ewing series 6), S. Das, J. Boatwright and C. H. Sholtz (Editors), *American Geophysical Monograph*, 37, Washington, D.C., 269-274.
- Kanamori, H., P.C. Jennings, S. K. Singh, and L. Astiz [1993] "Estimation of strong ground motions in Mexico City expected for large earthquakes in the Guerrero seismic gap", *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 811-829.
- Kamae K., Irikura K. and Pitarka A. [1998] "A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function", *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 2, 357-367.
- Nozu, A. and Morikawa H. [2004] "Assessment of soil nonlinearity using empirical Green's function method", *13th World Conf. on Earth. Eng.* Vancouver, Canada, 1-6.
- Ordaz, M., Arboleda, J. and Singh, S. K. [1995] "A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes", *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1635-1647.
- Ordaz, M. and Singh, S. K. [1992] "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City", *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1, 24-42.
- Pitarka A., Somerville P., Fukushima Y., Uetake T. and Irikura K. [2000] "Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 3, 566-586.
- Singh, S. K., R. Apsel, J. Fried, and J. N. Brune [1982] "Spectral attenuation of SH waves along the Imperial fault", *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 2003-2016.
- Somerville, P., Smith, N. and Graves R. [1997] "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seism. Res. Letters*, 68, 199-222.
- Tumarkin, A. G., R. J. Archuleta and R. Madariaga [1994] "Scaling relations for composite earthquake models", *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1279-1283.
- Wennerberg, L. [1990] "Stochastic summation of empirical Green's functions", *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 1418-1432.
- Zeng, Y., J. G. Anderson and G. Yu [1994] "A composite source model for computing realistic synthetic ground motions", *Geophys. Res. Lett.* 21-8, 725-728.

Table 1. Seismological parameters of earthquakes whose recordings were used in this study

Event	Date	Origin	Seismic Source	Mw	Depth (km)	M ₀ (dyne-cm)	Δσ (bar)
1*	19/09/85	Sub	Michoacan	8.1	16	1.05 x 10 ²⁸	150
2*	21/09/85	Sub	Michoacan	7.6	20	2.09 x 10 ²⁷	75
3*	24/10/93	Sub	Ometepec	6.7	22	1.20 x 10 ²⁶	10
4*	23/05/94	FN	West inter. depth	6.2	50	2.77 x 10 ²⁵	324
5 ^{§, ‡}	14/09/95	Sub	Ometepec	7.4	22	1.11 x 10 ²⁷	16
6*	20/04/98	FN	West inter. depth	5.9	60	1.01 x 10 ²⁵	206

*M₀ and Δσ from Ordaz and Singh (1992)*M₀ and Δσ from García *et al.* (2004)*M₀ and Δσ from Ordaz *et al.* (1995)§M₀ from CMT Harvard catalog

‡Δσ, see text

β, *Q_o* and *ε* from Ordaz and Singh (1992) and García *et al.* (2004) for subduction and intermediate depth earthquakes, respectively*k_o*=0.18 sec and *Q_I*=1500 km from Singh *et al.* (1982) were only used in events with thrust-faulting mechanism

Table 2. Stations, distances and earthquakes used in this work

Station	Lat.	Lon.	19/09/85		21/09/85		14/09/95		24/09/93	
				R(km)		R(km)		R(km)		R(km)
ACAD	16.767	99.88	-	-	-	-	✓	142	✓	104
ATYC	17.211	100.431	✓	134	✓	99	-	213	-	-
AZIH	17.603	101.455	✓	33	✓	28	-	-	-	-
CAYA	17.045	100.266	✓	159	✓	121	-	-	✓	151
CHIL	17.466	99.452	-	-	-	-	✓	139	✓	107
COPL	16.605	98.874	-	-	-	-	✓	27	✓	11
COYC	16.968	100.084	✓	181	✓	143	✓	167	✓	129
CPDR	16.769	99.633	✓	235	✓	198	-	-	✓	75
CUER	18.984	99.237	-	-	-	-	✓	283	✓	263
IGUA	18.391	99.503	-	-	-	-	✓	230	✓	204
MEZC	17.930	99.591	-	-	-	-	✓	192	✓	160
OCLL	17.038	99.875	-	-	-	-	✓	149	✓	110
OCTT	17.250	99.511	✓	224	-	-	✓	127	-	91
PAPN	17.328	101.040	✓	76	✓	30	-	-	-	-
PARS	17.344	100.214	✓	147	✓	121	-	-	✓	90
POZU	17.100	99.630	-	-	-	-	✓	128	-	-
SUCH	17.226	100.642	✓	114	✓	76	-	-	✓	227
TEAC	18.618	99.453	-	-	✓	246	✓	251	✓	176
ZIIG	17.607	101.465	-	-	-	-	-	-	-	-
CU	19.33	99.183	✓	295	✓	318	✓	320	✓	301
VI	19.33	99.183	✓	295	✓	318	✓	320	-	-
SCT	19.33	99.183	✓	295	-	-	✓	320	✓	301
CD	19.33	99.183	✓	295	✓	318	✓	320	✓	301

Station	Lat.	Lon.	23/05/94		20/04/98	
				R(km)		R(km)
ACAD	16.767	99.88	✓	146	-	-
ATYC	17.211	100.431	-	-	✓	149
AZIH	17.603	101.455	-	-	-	-
CAYA	17.045	100.266	-	-	-	-
CHIL	17.466	99.452	✓	133	✓	208
COPL	16.605	98.874	-	-	-	-
COYC	16.968	100.084	✓	127	✓	192
CPDR	16.769	99.633	-	-	-	-
CUER	18.984	99.237	✓	177	✓	218
IGUA	18.391	99.503	✓	120	✓	179
MEZC	17.930	99.591	✓	104	-	-
OCLL	17.038	99.875	✓	131	-	-
OCTT	17.250	99.511	-	-	-	-
PAPN	17.328	101.040	-	-	-	-
PARS	17.344	100.214	-	-	-	-
POZU	17.100	99.630	✓	142	-	-
SUCH	17.226	100.642	✓	88	✓	137
TEAC	18.618	99.453	-	-	-	-
ZIIG	17.607	101.465	✓	105	✓	87
CU	19.33	99.183	✓	206	✓	238
VI	19.33	99.183	✓	206	-	-
SCT	19.33	99.183	✓	206	-	-
CD	19.33	99.183	✓	206	✓	238

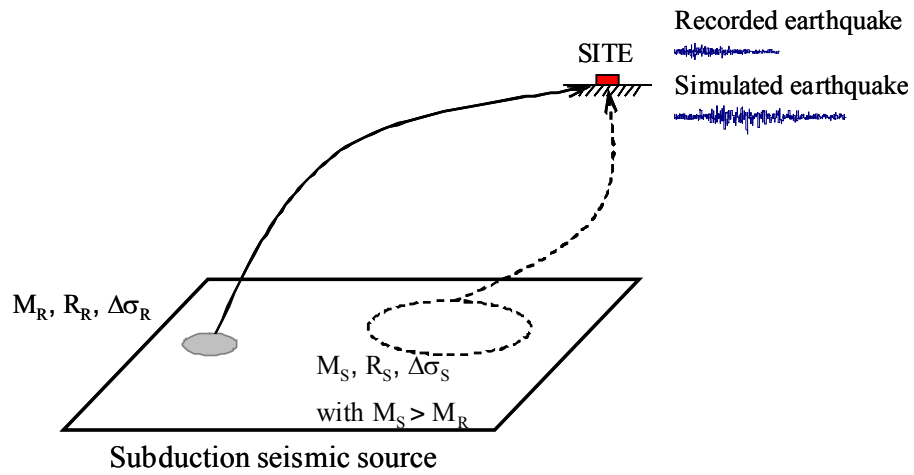


Fig. 1. Schematic representation of the purpose of this work. Shaded area shows the source of the recorded earthquake; dotted area shows the source where the simulated earthquake is desired for a given magnitude, M_S , distance, R_S and stress drop, $\Delta\sigma_S$. Sub-indexes R and S stand for recorded Green's function and simulated event, respectively

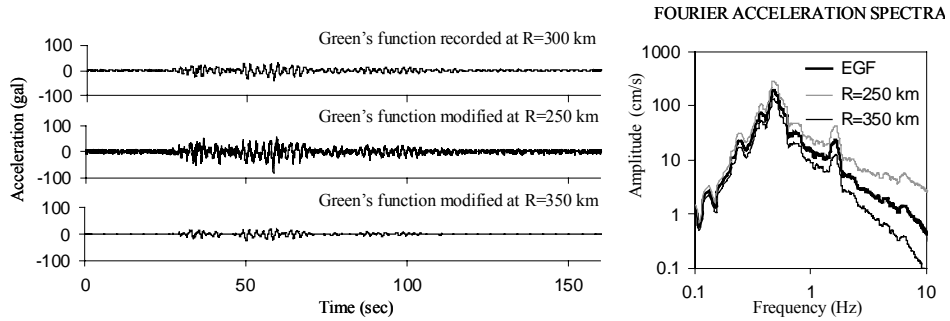


Fig. 2. Acceleration time histories of an event used as Green's function (top) and the Green's functions modified by attenuation (to 250 km, middle and to 350 km, bottom). On the right hand side the respective Fourier acceleration spectra are shown

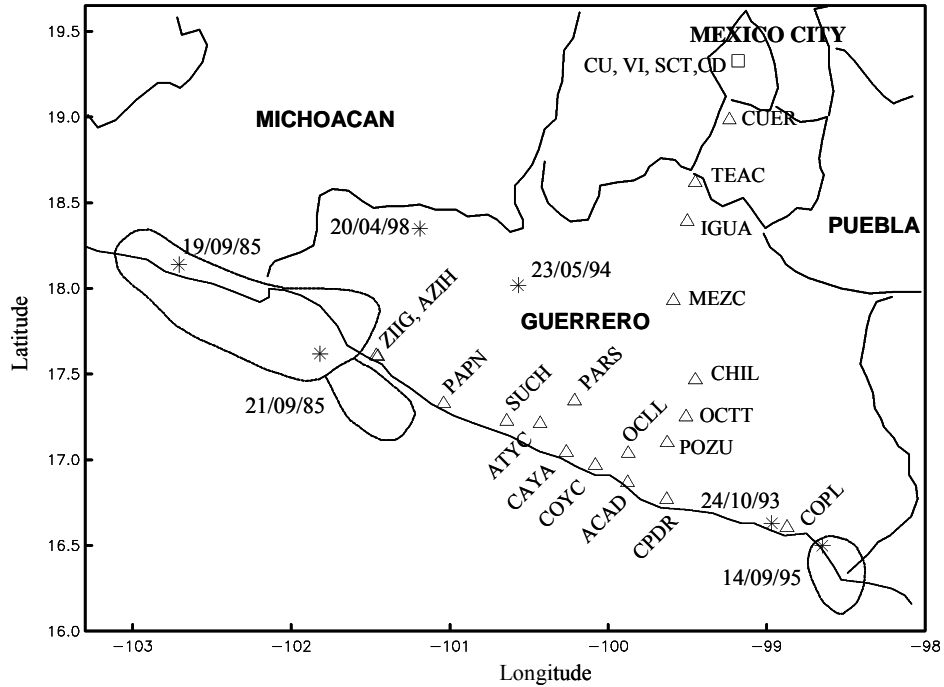


Fig. 3. Map of southern Mexico showing the location of stations outside (triangles) and inside (square) of the valley of Mexico, and the epicenter and rupture area of the events shown in Table 1

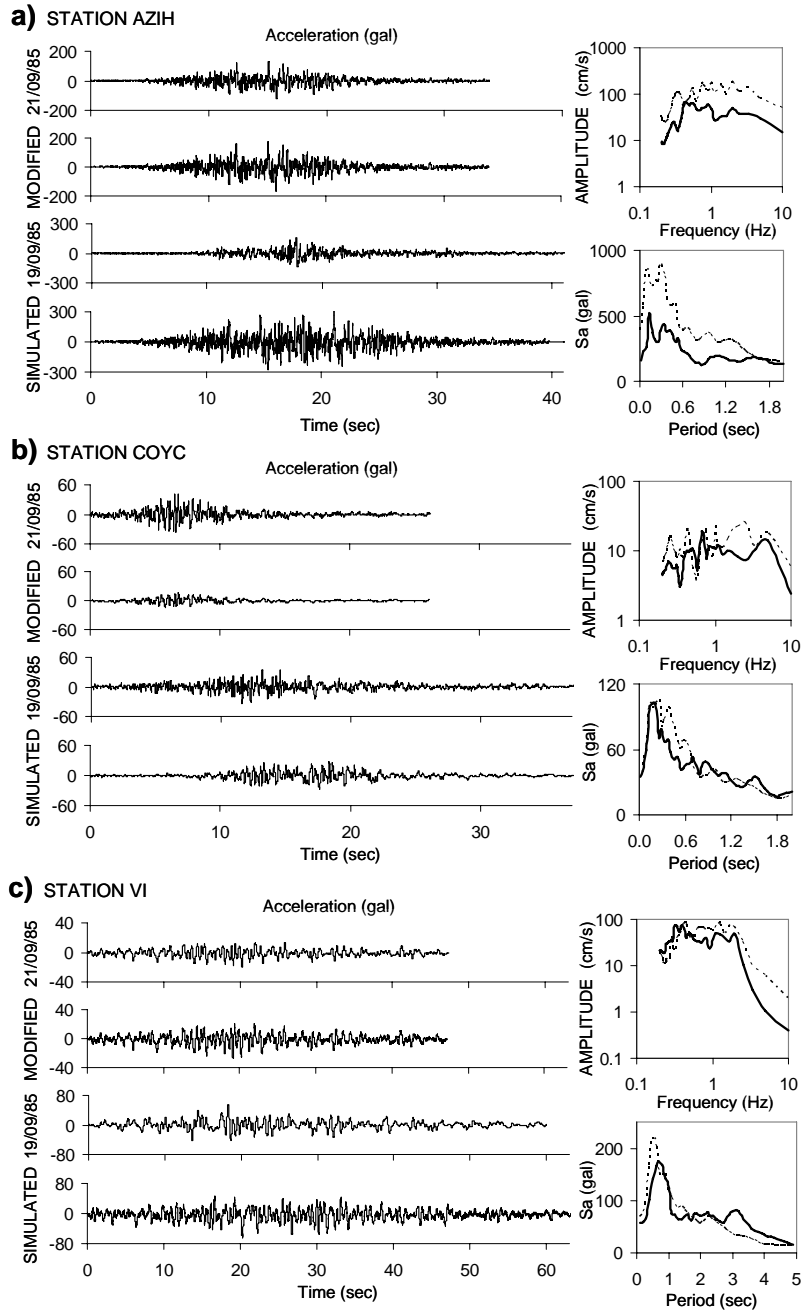


Fig. 4. Acceleration time histories for stations (a) AZIH, (b) COYC and (c) VI, (figure 3) of the 21 September 1985 event used as Green's function (top), the 21 September 1985 event modified by attenuation (middle-top), the 19 September 1985 taken as target event (middle-bottom), and the simulated event (bottom). On the right hand side: Fourier acceleration spectra (top) of the target event (solid lines) and the computed one (dashed lines) and (bottom) pseudo-acceleration, 5% damping, response spectra

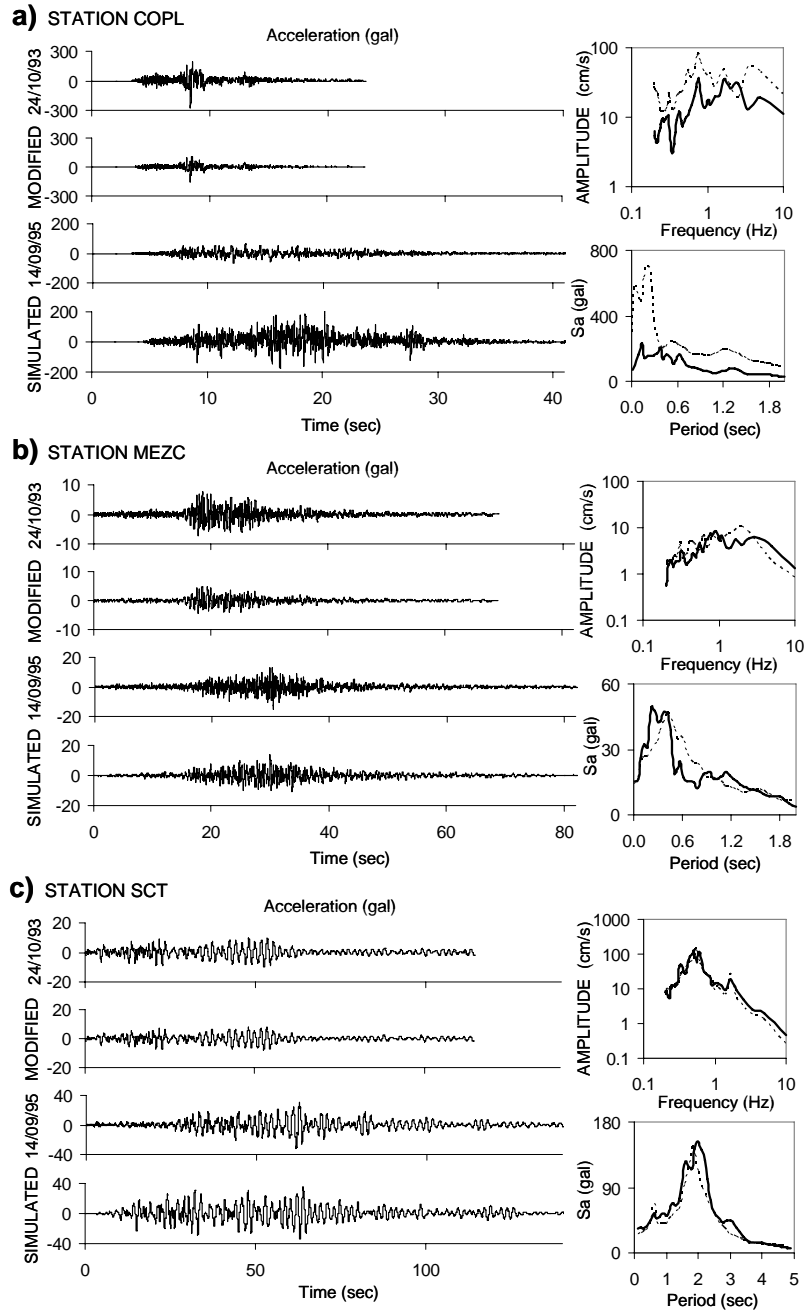


Fig. 5. Acceleration time histories for stations (a) COPL, (b) MEZC and (c) SCT, (figure 3) of the 24 October 1993 event used as Green's function (top), the 24 October 1993 event modified by attenuation (middle-top), the 14 September 1995 taken as target event (middle-bottom), and the simulated event (bottom). On the right hand side: Fourier acceleration spectra (top) of the target event (solid lines) and the computed one (dashed lines) and (bottom) pseudo-acceleration, 5% damping, response spectra

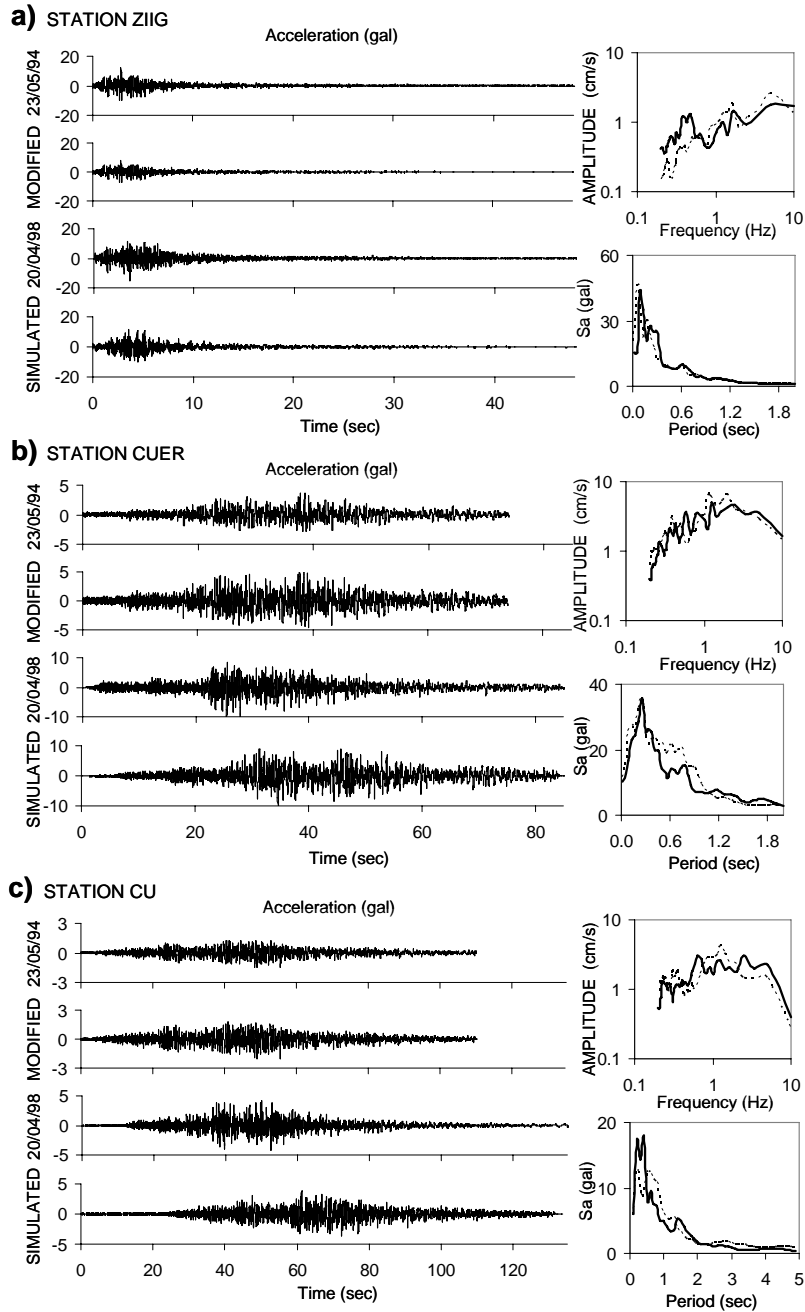


Fig. 6. Acceleration time histories for stations (a) ZIIG, (b) CUER and (c) CU, (figure 3) of the 23 May 1994 event used as Green's function (top), the 23 May 1994 event modified by attenuation (middle-top), the 20 April 1998 taken as target event (middle-bottom), and the simulated event (bottom). On the right hand side: Fourier acceleration spectra (top) of the target event (solid lines) and the computed one (dashed lines) and (bottom) pseudo-acceleration, 5% damping, response spectra

A proposal to obtain design accelerograms at sites affected by several seismic sources: the case of hard soil in Mexico City

Miguel A. Jaimes,^{a)} M.EERI and Eduardo Reinoso^{b)} M.EERI

A methodology to obtain design accelerograms in sites affected by several seismic sources is proposed. The hard soil in Mexico City is used as an example and a family of strong ground motions to be used in the practice and eventually to be included in the code is recommended. The design motions are calculated from three sources: local, subduction (the Guerrero gap) and intermediate depth (center of Mexico). First, a method of disaggregation probabilistic seismic hazard assessment is applied to determine the most probable magnitude and distance of certain seismic events that can generate a selected seismic intensity (spectral ordinate) associated to an exceedance rate at hard soil. Then, in order to generate the motions, we use the empirical Green's functions simulation method modified by attenuation. Finally, we propose: i) for which structural periods the spectral ordinates should be used so that the response of the expected motion fits the uniform hazard spectra and ii) the minimum number of design ground motions that must be considered to correctly evaluate the behavior of the structures. We show that the selected family of records is representative of all possible strong ground motions that may affect the site. They are very useful set of data ready to be used by structural engineers.

INTRODUCTION

In some cases, specially when it is necessary to evaluate the response in the inelastic range of important structures, it is not enough to define the seismic motion only in terms of a design spectra, which considers forces related to parameters of maximum response like the spectral acceleration and displacement. These parameters do not always have a direct correlation with loss and damage; moreover, the accumulated damage or degradation

a) Instituto de Ingeniería, UNAM, C. U., Apartado postal 70-472, Coyoacán 04510, México D. F.

b) Torre de Ingeniería, UNAM, C. U., Apartado postal 70-472, Coyoacán 04510, México D. F.

produced by the hysteretic behavior due to severe seismic shaking in a single event and during the useful life of the structure can not be considered. This is why accelerograms should be used in the design of important and complex structures like dams, bridges, tall or irregular buildings, structures where several modes of vibration could be important and structures designed to have high demands of ductility.

These accelerograms must reproduce as well as possible the motion expected at the site. This motion should take into account the influence of parameters such as the magnitude, distance, fault mechanism and site effects. Unfortunately, the available codes and manuals are vague just mentioning that accelerograms must be appropriate and compatible with the design spectra. The criteria implemented by current regulations do not contain sufficient information for engineers, so they can not use practical methods to generate design accelerograms, and they end up using whatever is available and, in many cases, very unlikely useful for the specific structure that they are analyzing.

There are different ways to obtain accelerograms for design purposes. The easiest one is the use of records available in worldwide databases (Boomer *et al.*, 1998; 2000) with similar characteristics; this means that the seismic event should have approximately the same magnitude and distance, and the soil profile should be similar. Engineers use this approach but many times are not aware of the differences between seismic sources, attenuation and site effects. Another practical option is to scale existing accelerograms of the site up to a required level of intensity. Due to its simplicity, this option is also very popular among engineers; however, scaling only considers the amplitude since it is difficult to take into account magnitude and distance with the respective change in the frequency content and duration of motion. Another approach is to use simulated earthquake motions compatible with a prescribed and well-known design spectra of the site; however, these time histories do not have the appearance of real earthquakes motions, and when the structure is subjected to them, the demands of displacements and the input energy are overestimated (Naeim and Lew, 1995). Another alternative is to develop a set of parametric functions that describe the evolution of the instantaneous intensity and frequency content of ground acceleration in terms of the magnitude and source-to-site distance (Nojima and Kameda, 1988; Alamilla *et al.*, 2001) but it is necessary to have a considerable number of accelerograms recorded in the site to find statistical parameters as a function of the magnitude and distance. Another option

is to simulate earthquake motions based on a physical model that considers the source, wave propagation and site effects: the one proposed by Boore (1983) which has been validated for its use in engineering applications (Silva *et al.*, 1999) and an alternative model more convenient to generate motions of distant faults proposed by Hartzell (1978) that uses small registered earthquakes as empirical Green's functions to synthesize large earthquake records; these methods have the advantage of considering a physical model of the source, but still there are uncertainties in the estimate of seismological parameters such as the stress drop, seismic moment, attenuation and others. Finally, in the last years, probabilistic seismic demand analyses have been carried out (Shome *et al.*, 1998; Shome and Cornell, 1998; Chan *et al.*, 2005) with the purpose to find, for a certain structure, the number of records to be used, scaling records to estimate the seismic demand. This includes a disaggregation of the seismic drift hazard (Baker and Cornell, 2005) to find the pairs of magnitude and distance that cause a certain drift. However, there are still many obstacles to adopt these approaches in the common and simple engineering practice. These methods need a considerable number of accelerograms in the site in order to determine the number of records useful to design the structure for a given design drift.

Engineers can use any of the above approaches to obtain accelerograms to analyze their structures, and they have to keep in mind that every site is affected by many seismic sources. Several accelerograms are needed in order to predict the behavior that the structure would have in its useful life. Moreover, it is possible to expect different seismic motions due to variations and uncertainties in the parameters (seismological, simulation model and others). This information is included in the uniform hazard spectra (UHS) which takes into account the contribution of all seismic sources. But this UHS is not available to engineers since they commonly use the design spectrum, which for some ordinates the seismic intensities could be overestimated; therefore, the most practical approach is to find a family of accelerograms that fit the UHS and make them available to engineers.

In what follows, the main seismic sources which produce strong ground motions at a site are determined. We obtain, using a technique of disaggregation probabilistic seismic hazard assessment (Chapman, 1995), the most likely values of magnitude and distance to generate seismic motions whose intensity value (spectral ordinate) is associated to a given annual frequency of exceedance. This allows us to select ground motions that represent the most likely motions of the seismic hazard for a given motion parameter and hazard level. We use

and validate the empirical Green's functions simulation method (Ordaz *et al.* 1995). Also, we propose how to obtain appropriate seismic design motions for hard soil at the south of Mexico City for being an excellent example of a place frequently affected by many seismic sources.

SEISMIC SOURCES

There are many places in the world that are affected by different seismic sources and several ground motions should be used in order to cover all strong ground motion possibilities. In this sense, Mexico City is one of the most challenging examples, apart from its very well known site effects.

The seismic risk in Mexico City is related to three sources: subduction, intermediate depth and continental or local earthquakes. All of them have caused in the past economic losses and fatalities. The subduction earthquakes not only take place with more frequency, but they also cause the more violent motions in the valley of Mexico since the type of waves they produce are rich in long periods that suffer less attenuation and large amplification in the lakebed zone. The earthquakes of intermediate depth are located inside the oceanic plates. Historically, these earthquakes have caused important damage to cities like Morelia and Mexico (1858), Oaxaca (1931), Orizaba (1973) and Puebla (1999). The magnitude of these earthquakes is rarely larger than 7.0, and its occurrence is much more sporadic; however, due to the location of the source and the proximity to large urban settlements they represent a very high risk to the central population of Mexico (Singh, 2003). Local or continental earthquakes are the sources that could yield the largest intensities at hard sites but its seismic hazard is small due to their very large periods of recurrence (>1000 years).

Therefore, subduction and intermediate depth earthquakes represent the maximum perils for the hill zone in Mexico City. Figure 1 shows the limits and location of the main subduction and intermediate depth seismic sources idealized by polygons (Nishenko and Singh, 1987); it also shows, together with their date and magnitude, the location of epicenters of some of the subduction (rectangles) and intermediate depth (triangles) earthquakes used in this study. As can be seen in Fig. 1 the earthquakes included in this study cover a wide range of sources, magnitudes and distances to Mexico City.

The growth of Mexico City has originated an important urban development to the south, where commercial, business, educational and residence centers and bridges have recently

been built. Here, the hard zone is formed by volcanic tuff and lava flows. The station Ciudad Universitaria (CU) is located in this area and it is considered the main seismic reference site because since 1964 it has recorded more than 20 moderate and intense earthquakes ($M > 6.0$). This makes CU the most prolific free field accelerometric station in the world, and allows us to make good predictions of the expected motion in Mexico City.

UNIFORM HAZARD SPECTRA

For the selection of the seismic design motions it is desirable to rely on a Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) (Cornell, 1968; Esteva, 1970). This allows us to obtain the frequency with which an earthquake characteristic (*e.g.* peak ground, duration, spectral ordinate) is larger than a specified value during a certain time. In this way, it is possible to include all possible seismic sources that may affect the zone, taking into account all combinations of magnitudes and distances. The output of a PSHA is one or more seismic hazard curves relating strong-motion parameters to return period at the site.

Seismic hazard curves at hard sites in Mexico City, given in terms of exceedance rates for spectral pseudoacceleration, were computed for periods between 0 and 4 sec. The seismic sources previously shown (Fig. 1) and three different attenuation laws were used to calculate the seismic hazard with the CRISIS software: i) for the subduction earthquakes the relationship derived by Jaimes *et al.* (2006) using 21 accelerograms recorded at the CU station was used, ii) for intermediate depth earthquakes an attenuation law presented by Montalvo *et al.* (2002) was employed, and finally, iii) for the Tran-Mexican Volcanic Belt we used the relation of Sadigh *et al.* (1997). Figure 2 shows seismic hazard curves in terms of spectral pseudoacceleration (5% damping) in CU for two structural periods ($T=0.2$ sec and $T=2$ sec). The plots correspond to the following seismic sources: subduction (thin continuous lines), intermediate depth (thick continuous lines), local (thin discontinuous lines), and the total contribution of all sources (thick gray lines). It can be observed that the seismic hazard for structures with periods around 0.2 sec (fig. 2a) is dominated by the sources of intermediate depth (thick continuous lines), and for structures with $T=2$ sec (fig. 2b) is dominated by subduction sources (thin continuous lines). Events of local origin (thin discontinuous lines) also may affect structures with short period. All these differences are also true and important when talking about time histories.

From the seismic hazard curves it is possible to obtain the uniform hazard spectra (UHS) associated to an exceedance rate (inverse return period). The uniform hazard spectrum represents the seismic ordinates whose intensities have the same probability to occur, considering the contribution of all seismic sources. For example, if we are to build in CU a UHS we get, considering Figure 2a, for a structural period of 0.2 sec the spectral intensities of 1.33 m/s^2 and 2.79 m/s^2 for exceedance rates of 1/125 and 1/475 (1/yr), respectively. We proceed analogously for a structural period of 2 sec and, in this case, the spectral ordinates for the same exceedance rates are 1.06 m/s^2 and 1.64 m/s^2 (Fig. 2b).

Following the previous procedure for several structural periods the UHS was built for 125 (thin line) and 475 years (thick line) (Fig. 3). In this UHS there are two maximum ordinates that reflect the seismic hazard dominated by two types of sources: intermediate depth, in $T=0.2$ sec and subduction, in $T= 1$ sec.

The uniform hazard spectrum is a well-known tool to obtain the design spectrum. The use of design spectrum is a common practice in engineering but due to its parametric shape some of the seismic intensities are overestimated for certain structural periods in relation to the UHS (Fig. 3). This is why we believe that design accelerograms should fit the UHS and not the intensities of the design spectrum. The selected return period is the used to calculate the design spectra for Mexico City Design Code (Ordaz *et al.* 2000). Therefore, we assumed that such return period give levels of intensity that will provide an acceptable level of risk.

For most sites in the world, a single motion associated to a level of hazard is not going to be enough to represent all possibilities of motion that will affect the structures in their useful life, so several motions should be employed to cover all scenarios contained in the UHS. In this way, we propose to use motions with different frequency content to test some parameters of the structural response like the ductility demand (Lam and Hutchinson, 1996). In the case of Mexico City, Jaimes and Reinoso (2006) showed that intermediate depth earthquakes caused large interstory drifts in structures of short period and more participation of higher modes of long period structures. Therefore, a sound design of a structure in the hard zone in Mexico City must use at least design accelerograms of subduction earthquakes as well as intermediate depth and local ones. In this way, one would be able to better evaluate the structural response and to determine the damage that these types of earthquakes could cause.

DISAGGREGATION PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

A disaggregation probabilistic seismic hazard assessment (DPSHA) is applied to identify the seismic scenarios that contribute more significantly in the seismic hazard of the site. Numerous works can be useful to obtain a DPSHA (Ishikawa and Kameda, 1988, 1991; Chapman, 1995; McGuire, 1995; Bazzurro and Cornell, 1999; Alamilla *et al.*, 2001). These works discuss how to obtain the magnitude and distance of the seismic source to generate design motions. These proposals use a joint conditional probability density distribution of the magnitude and the distance for a level of intensity in the PSHA model. We have calculated the DPSHA using the technique described in Chapman (1995). We obtained couples of values of magnitude and distance that occur more frequently (mode). With these values it is possible to compute seismic design motions according to a realist seismic scenario.

The joint conditional probability density distributions of the magnitude and the distance were calculated for a return period of 125 years, and for peak ground acceleration (PGA) and structural periods of 0.2, 0.5, 1, 2 and 3 sec, which intensities correspond to 0.53, 1.33, 1.02, 1.27, 1.06 and 0.56 m/s^2 , respectively. These structural periods were selected to illustrate that different periods correspond to different seismic scenarios given in terms of magnitude and distance. Figure 4 shows joint conditional probability density functions of magnitude and distance obtained of the DPSHA; the modal values of the magnitude, M, and distance, R, that present the largest probability of occurrence are also indicated. The magnitude and distance define the seismic area to choose the EGF appropriate to represent the seismic source of interest: e.g. in Mexico City, one large and distant seismic motion corresponds to a subduction source and a large and less distant seismic motion corresponds to an intermediate depth source. Three hazard density functions are bi-modal (PGA, T=0.2 and 0.5 sec), clearly reflecting the contributions from two seismic sources and other three uni-modal (T=1, 2 and 3 sec). It can be appreciated that for T=0.2 and 0.5 sec the seismic hazard is dominated by intermediate depth earthquakes (M 7.7, R 160 km) and for T=1, 2 and 3 sec by subduction earthquakes (M 7.7, R 263 km). But there are clearly other pairs of modal values for different structural periods than should be taken into account to properly represent the most probable seismic motions, like the magnitude 4.8 due to local origin for short period and a magnitude 7.7 at 160 km, due to the intermediate depth source. These events contribute equally to seismic hazard but their ground motions are expected to be different.

SIMULATION OF STRONG GROUND MOTION THAT FIT THE UHS

We used pairs of magnitude and distance to generate synthesized ground motions in hard soil (CU) using the empirical Green's functions method (Ordaz *et al.* 1995) for seismic intensities (spectral ordinates) associated to a return period of 125 years. The application of the method requires recorded earthquakes, generally small ones, used as empirical Green's functions (EGF) simulating motions of different magnitude for the same epicentral distance. But we need to simulate not only motions with different magnitude but also with different distance since it is very unlikely that the distance obtained with the disaggregation process corresponds to the one of the recorded earthquake.

Two CU records of very good quality where P and S wave arrivals and codas are clearly seen (Fig. 5) were used as EGF to obtain the synthesized motions: 2000 July 21 (intermediate depth) and 1989 April 25 (subduction). The use of EGF requires the knowledge of the parameters that characterize future large events which are often unknown and with large uncertainties that largely influence the ground motion estimates. One of the most important and least studied parameters is the stress drop, $\Delta\sigma$. Table 1, shows the seismological parameters used to modify the two EGF for attenuation effects. Due to the variability of time delays in the simulation model, the synthesized motions are obtained by successive approximations until the required seismic ordinate is reached.

Figure 6 shows the simulated accelerograms with their corresponding values of magnitude and distance for peak ground acceleration (PGA) and the structural periods of $T=0.2, 0.5, 1, 2$ and 3 sec; these motions present the appearance of real earthquake motions and preserve the characteristics of their source such as amplitude and frequency content. For instance, intermediate depth motions present higher frequency content ($T=0.2$ and 0.5 sec) with respect to the subduction motions ($T=1, 2$ and 3 sec). Figure 6 also shows a local type strong ground motion. As will be explained next, peak ground acceleration in Mexico City is dominated by local earthquakes. To obtain a local motion, we simply scaled the PGA of the 1974 July 12 ($M=3.5$) local earthquake to give the required level of intensity since there is very little information regarding stress drop and magnitude.

The synthesized acceleration response spectra were calculated and compared with the UHS for a return period of 125 years to illustrate that each one covers a section of this UHS. Figure 7 shows this UHS (thick lines) and the acceleration response spectra (thin lines) of the simulated records shown in Fig. 6. It can be observed that the seismic ordinates

corresponding to each one of the structural periods are well estimated, but they are underestimated for other structural periods. This is because such ordinates correspond and should be covered by other seismic scenarios. It is also observed that the response spectra slightly exceed in some periods the values of the ordinates of the UHS but this overestimation is not significant for engineering purposes.

We propose a set of accelerograms that fits the UHS. It is expected that short period structures could be excited by an intermediate depth motion or a local event, and long period structures by a subduction motion. In what follows, we propose for which structural periods the spectral ordinates should be calculated for a UHS of 125 years. These design motions are next explained, and their response spectra are shown in Figure 7.

- Accelerograms I: The first seismic motion must be a local earthquake with a PGA is associated to the UHS (Fig. 7). This ground motion should be used not only for rigid structure but also for the analysis of earth embankments and slopes.
- Accelerograms II: As was shown in Fig. 3, there is a peak in 0.2 sec caused by intermediate depth sources (Fig. 7).
- Accelerograms III: The third seismic motion must be selected either from an intermediate depth or a subduction source associated to a structural period of 0.5 sec; this is because the seismic hazard is dominated by both seismic sources (Fig. 3). For a structure with short period, a intermediate depth earthquake must be used, and for the case of a structure with long period, a subduction earthquake must be selected.
- Accelerograms IV, V and VI: For structural periods larger than 1 sec, the seismic hazard is dominated by subduction sources (Fig 3). At least three seismic motions must be selected for $T=1$ and 2 sec (Fig 4) and, for large period structures ($T>2$ sec), another accelerogram for $T=3$ sec.
- Accelerograms VII: This motion must correspond to the fundamental period of the structure to be designed. For the case of a structure with short period, a local or intermediate depth earthquake must be used, and for the case of a structure with long period, a subduction earthquake must be selected. This accelerogram could be obtained simply by modifying the time step of one of the above records. It should be noted that this record will yield the maximum elastic response.

CONCLUSIONS

In this paper, a relatively simple methodology to obtain design accelerograms particularly useful for sites affected by several seismic sources is presented. Mexico City firm soil is used as example. First, the main seismic sources that affect the site are determined through a Probabilistic Seismic Hazard Assessment. Second, applying a method of Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Analysis, we find the magnitude and distance which are more likely to generate an intensity associated to a given return period. Third, after analyzing many periods it is found for which structural periods the spectral ordinates should be calculated in order to fit the uniform hazard spectra (UHS). And, fourth, an empirical Green's functions is used to simulate the strong motion..

With this methodology, we recommend a family of strong ground motions to be used in the practice in the hard soil of Mexico City. We obtained for this site that a minimum of seven design accelerograms must be used to fit the UHS. We indicate for which structural periods the spectral ordinates should be calculated associated to the UHS. These motions must be generated for a spectral ordinate associated to a return period for the following periods: (I) the first for a PGA, where the motion must be local type; (II) the second should fit the intensity in $T=0.2$ sec, this correspond to an intermediate depth source; (III) the seismic motion must be selected from an intermediate depth or subduction associated to a structural period of $T=0.5$ sec; (IV, V and VI) for $T=1, 2$ and 3 sec, from a subduction source; and (VII) for the fundamental period of the structure to be designed. They are a very useful set of data ready to be used by structural engineers.

ACKNOWLEDGMENTS

The first author gratefully acknowledges the financial support of CONACyT.

REFERENCES

- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer, J.J. (1996). Prediction of horizontal spectra in Europe, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Alamilla J., Esteva L., García P. J. and Díaz L., O. (2001). Simulating earthquake ground motion at a site, for given intensity and uncertain source location, *Journal of Seismology*, 5, 4, 475-485.

- Baker J.W., Cornell C.A. and Tothong P. (2005). Disaggregation of seismic drift hazard, *Proceedings, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Rome, Italy, Submitted.
- Bazurro P. and Cornell C. (1999). Disaggregation of seismic hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 2, 501-520.
- Bommer J.J., Scout S. G. and Sarma S. K. (1998). Time-history representation of seismic hazard, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.
- Bommer J.J., Scott S.G. and Sarma S.K. (2000). Hazard-consistent earthquake scenarios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 219-231.
- Boore D. G. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894.
- Chan S., Ruiz S. and Montiel, M. (2005). Escalamiento de acelerogramas y mínimo número de registros requeridos para el análisis de estructuras, *Revist of seismic engineering*, National, 7, 1-24.
- Chapman M. (1995). A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 3, 937-942.
- Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 5, 1583-1606.
- Esteva L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería, *Series del Instituto de Ingeniería*, 246.
- García D. Singh S. K., Herráiz M., Pacheco J. F. and Ordaz M. (2004). Inslab earthquakes of Central Mexico: Q, source spectra and stress Drop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 3.
- Hanks T. C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research*, 84.
- Hartzell S. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letter*, 5, 1-4.
- Iglesias A., Singh S. K., Pacheco, J. F. and Ordaz M. (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, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92(3), 1060-1071.
- Ishikawa Y. and Kameda H. (1988). Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, II, 89-94.
- Ishikawa Y. and Kameda H. (1991). Probability-based determination of specific scenario earthquake, *Proceedings of Four International Conference of Seismic Zonation*, II, 3-10.
- Jaimes M. A. and Reinoso E. (2006). Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y falla normal, *Accepted for publication in Revist of seismic engineering*, National.

- Jaimes M. A., Reinoso E. and Ordaz M. (2006). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, *Accepted for publication in Journal of Earthquake Engineering*.
- Joyner W. y Boore D. (1988). Measurement, characterization, and prediction strong ground motion, *Proceedings of Earthquakes Engineering and Soil Dynamics*, II GT Div./ASCE, Park City, Utah June 27-30, 1988; 43-101.
- Lam N. Wilson J. and Hutchinson G. (1996). Buildings ductility demand: interplate versus intraplate earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 965-985.
- McGuire. (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1275-1284.
- Montalvo-Arrieta J., Reinoso E., J. C., Sánchez-Sesma, F., Singh S.K., Pacheco, J. and Ordaz M. (2002). The seismic response of the hill zone in Mexico City: A review and new findings, *Submitted for review and publication Bull. Seism. Soc. Am.*
- Naeim F. and Lew M. (1995). On the use of the design spectrum compatible time histories, *Earthquake Spectra*, 11, 1, 111-127.
- Nishenko S. P. and Singh S. K. (1987). The Acapulco-Ometepec, México earthquake of 1907-1982: Evidence for a variable recurrence history, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 1359-1367.
- Nojima N. and Kameda H. (1988). Simulation of risk-consistent earthquake motion, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, II, 95-100.
- Ordaz M., Singh S. K. and Arciniega A. (1994). Bayesian attenuation regressions: an application to Mexico City, *Geophysical Journal International*, 117, 335-344.
- Ordaz M., Arboleda J. and Singh, S. K. (1995). A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, No. 6, 1635-1647.
- Ordaz M, Miranda, E. and Avilez J. (2000). Propuesta de espectros de diseño para el DF, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Reyes, C. (1999). El estado limite de servicio en el diseño sísmico de edificios, *Ph. D. Thesis*, Faculty of Engineering, UNAM 1999.
- Sadigh K., Chang, C.Y., Egan, J.A., Makdise, F. and Youngs R.R (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seismological Research Letters*, 68, 1, 180-189.
- Shome N., Cornell C.A., Bazurro P. and Carballo J.E. (1998). Earthquakes, records and nonlinear responses, *Earthquake Spectra*, 14, 3, 469-500.

Shome N. and Cornell C.A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of non-linear structures, *Report No. RMS-35, RMS Program Stanford University, Stanford* ([http://pitch.stanford.edu/rmsweb/Thesis/Nilesh Shome.pdf](http://pitch.stanford.edu/rmsweb/Thesis/Nilesh%20Shome.pdf)).

Silva W., Gregor N. and Darragh B. (1999). Near fault motions, *Report for PG&E PEER*.

Singh S. K. (2003). Advances in seismology with impact on earthquake engineering, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Masterful Conference, León, Gto.*

Table 1. Seismological parameters of the events used as empirical Green functions

Event	Type	M	R (km)	β (km/s)	Q_o	ε	k_o	Q_l	M_{os} (dinas.cm)	$\Delta\sigma$ (bars)
25/04/89	Subduction	6.9	290	¹ 3.20	¹ 273	¹ 0.66	¹ 0.18	¹ 1500	¹ 2.4X10 ²⁶	¹ 150
21/07/00	Int. depth	5.9	140	² 4.68	² 251	² 0.58	¹ 0.18	¹ 1500	³ 6.0x10 ²⁴	² 298

¹ Ordaz *et al.* (1995)

² García *et al.* (2004)

³ Iglesias *et al.* (2002)

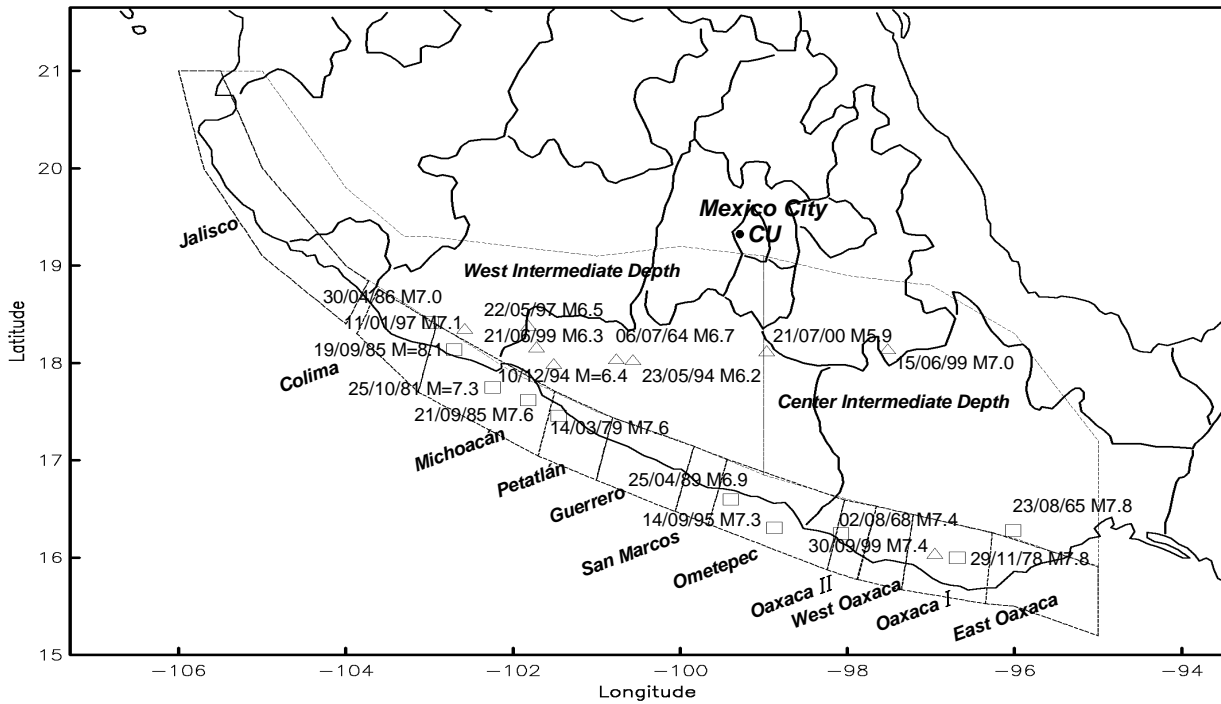
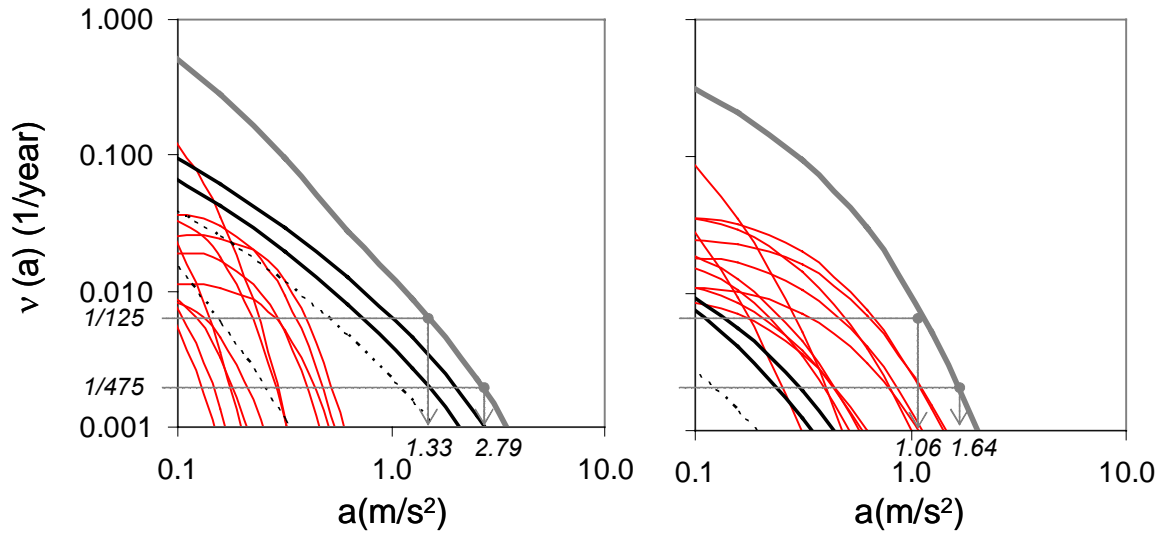


Figure 1. Seismotectonic subduction and intermediate depth zones idealized by polygons (Nishenko and Singh, 1987) and epicenters of earthquakes used in this study: Rectangles, Subduction events, and Triangles, Intermediate depth ones



a) Structural period: 0.20 sec

b) Structural period: 2 sec

Figure 2. Seismic hazard curves for two structural periods at hard soil in Mexico City. Subduction sources (thin continuous lines), intermediate depth sources (thick continuous lines), events of local (thin discontinuous lines) and all sources (gray continuous lines)

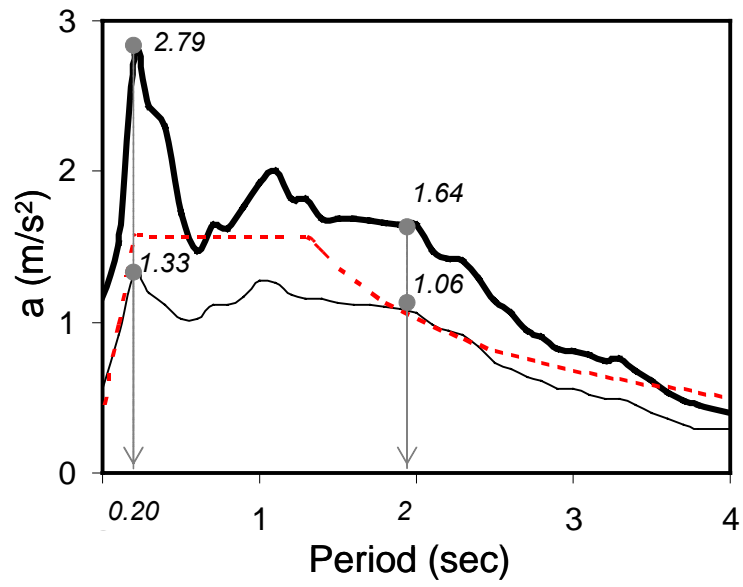


Figure 3. Uniform Hazard Spectra at hard soil in Mexico City for two return periods:125 (thin line) and 475 years (thick line) and Design Spectrum (discontinuous line) which was built based for 125 years

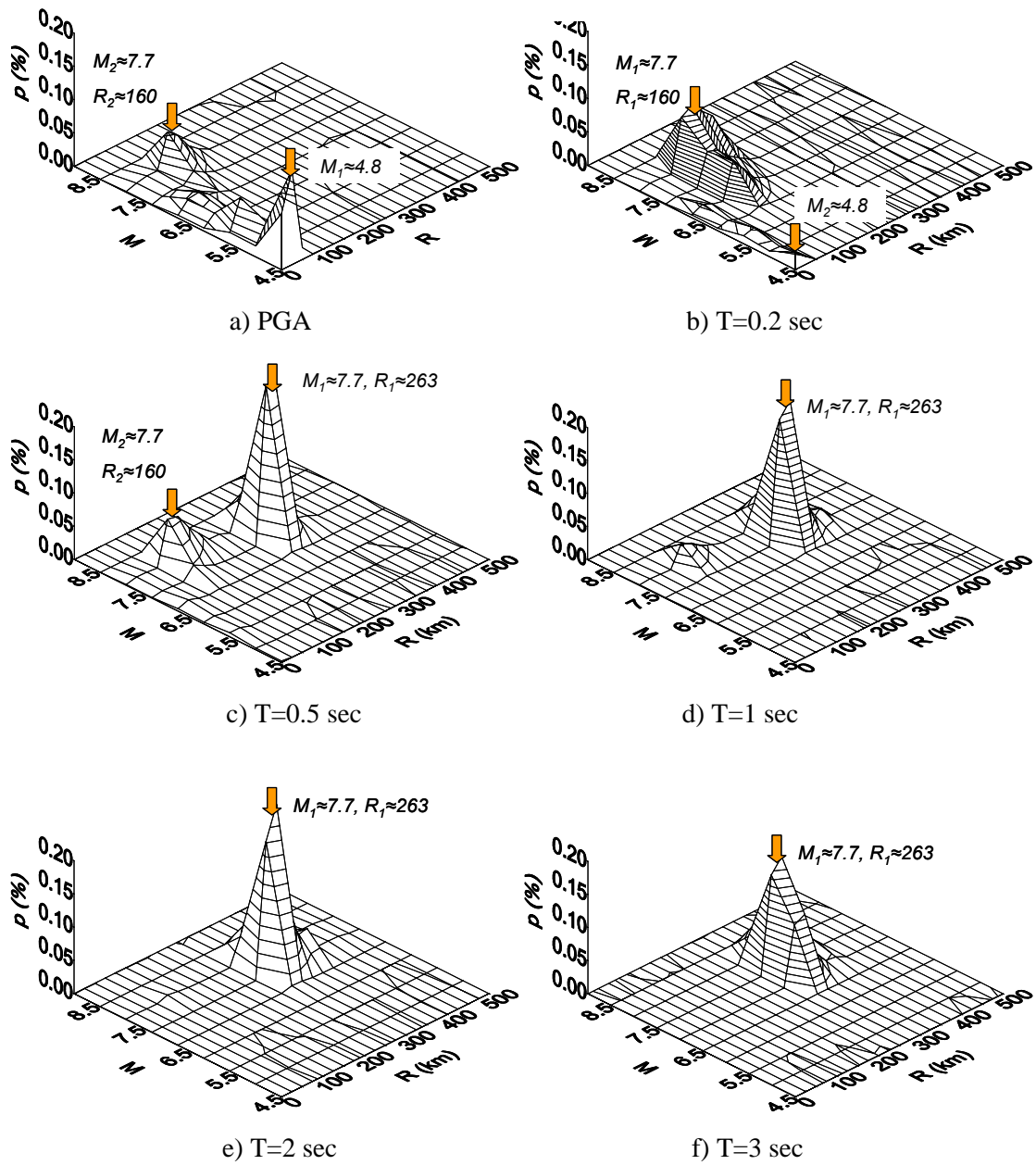


Figure 4. Joint conditional probability density functions of the magnitude and distance which seismic intensity is associated to a return period of 125 years, for different structural periods in hard soil. The pairs of values of magnitude and distance that have the largest probability to generate this intensity are indicated

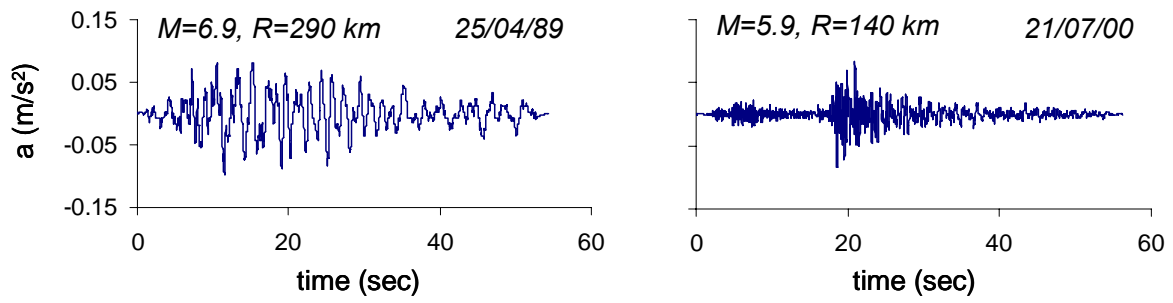


Figure 5. Two events recorded used as empirical Green's functions at hard soil in Mexico City

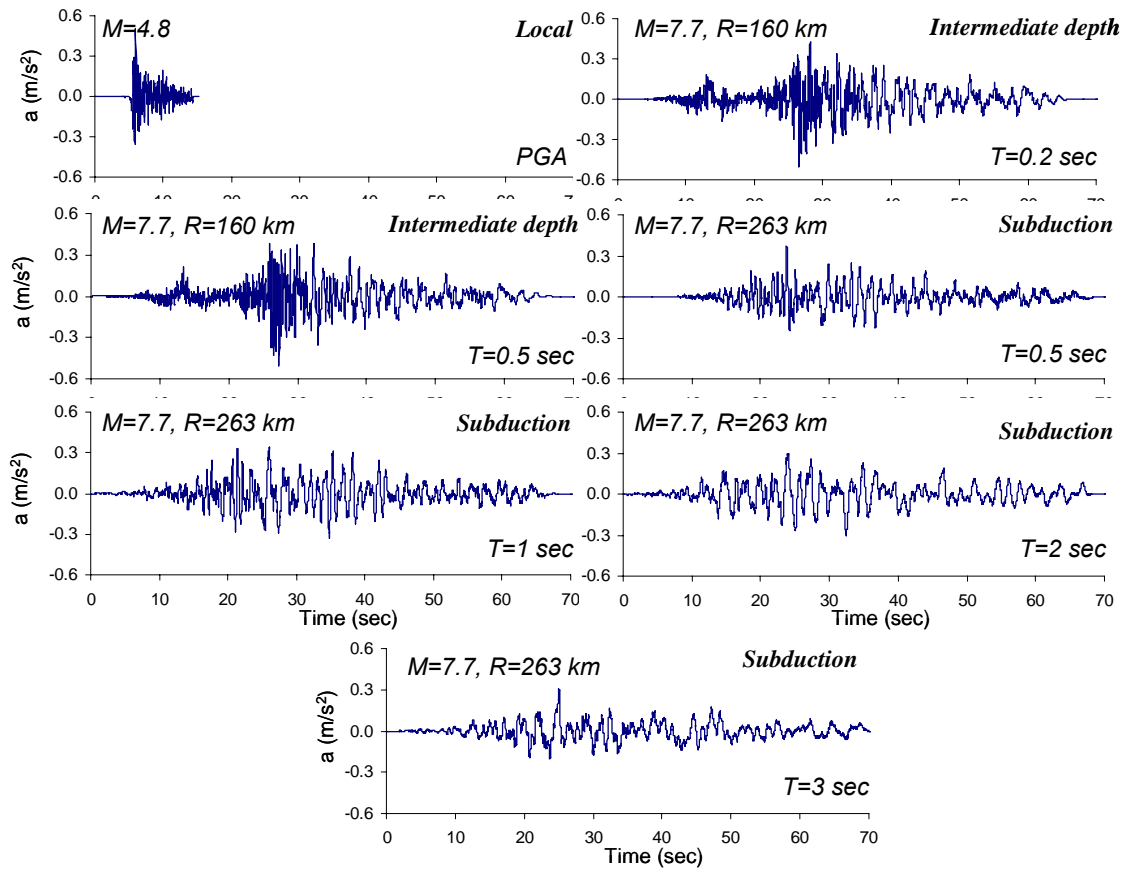


Figure 6. Synthesized accelerations of local, intermediate depth and subduction type which PGA intensity and for structural periods of $T=0.2$, 0.5 , 1 , 2 and 3 sec are associated to a return period of 125 years

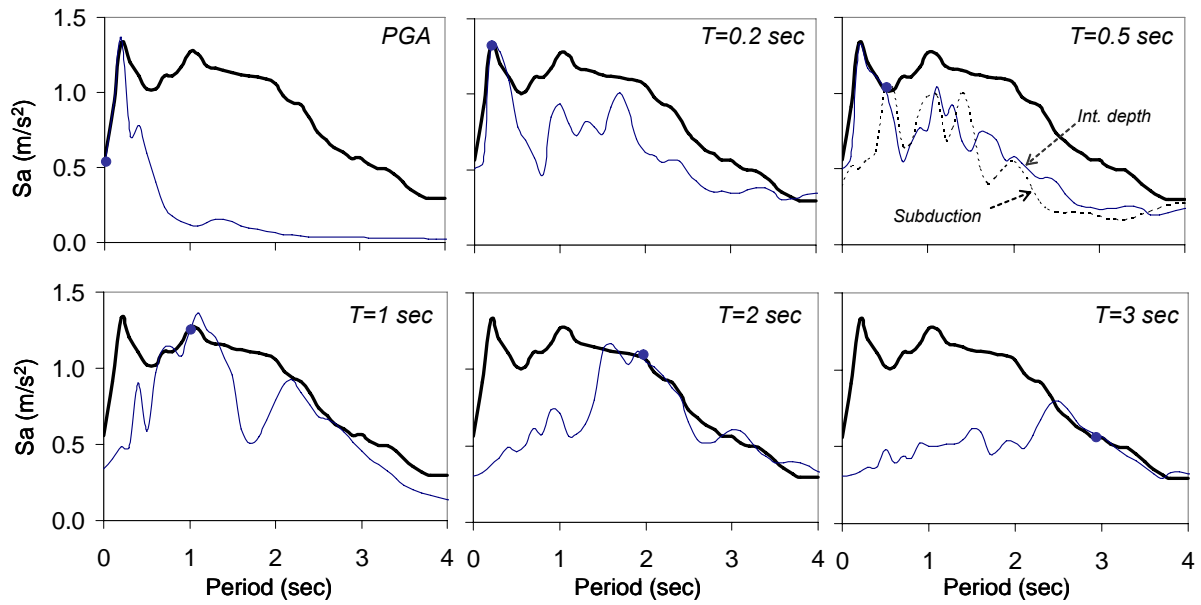


Figure 7. Uniform hazard spectra for a return period of 125 years (thick lines) and response spectra of the synthesized accelerograms which seismic intensity is associated to PGA and to the structural periods of 0.2, 0.5, 1, 2 and 3 sec (thin lines)