

METODOLOGÍA PARA ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA EN GUATEMALA APLICACIÓN AL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Belén Benito¹, Enrique Molina² y Luis Laín³.

1. *Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid, España.* 2. *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) Guatemala.* 3. *Instituto Geológico y Minero de España*
[\(ma_ben@nivel.euitto.upm.es\)](mailto:ma_ben@nivel.euitto.upm.es)

RESUMEN

Este trabajo ha sido resultado de un proyecto de colaboración de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el INSIVUMEH de Guatemala. El objetivo del trabajo ha sido el desarrollo de una metodología para estudios de amenaza sísmica en Guatemala, teniendo en cuenta los condicionantes sismotectónicos de la región, lo que ha llevado a definir diferentes escenarios y a estimar la contribución de cada uno de ellos en la peligrosidad. Una aplicación práctica se ha llevado a cabo en la ciudad de Guatemala, donde se han estimado las aceleraciones máximas y los espectros de respuesta asociados a cada escenario, con el fin último de obtener resultados que puedan servir de base para la adopción de un código sismorresistente en el país.

Palabras clave: amenaza sísmica, espectros de respuesta, códigos sísmicos

ABSTRACT

This work has been result of a research project among the Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), el Instituto Tecnológico y Geominero de España (ITGE) and the INSIVUMEH de Guatemala. The subject has been the development of a methodology for seismic hazard studies in Guatemala, taking into account the main seismotectonics conditions at the region, which involve the definition of different scenarios and the estimation of their contribution to the hazard. One application has been done in Guatemala city, where the maxima accelerations and the response spectra associated to each scenario have been calculated, trying to obtain useful results aimed to the adoption of a seismic code in the country.

Key words: seismic hazard, response spectra, seismic codes.

1. Introducción y objetivos

La tectónica de Guatemala es el resultado de la interacción de tres placas tectónicas importantes, Norteamérica, Cocos y Caribe, por lo que la amenaza sísmica del territorio está determinada por la actividad de fuentes sísmicas asociadas a diferentes procesos que tienen lugar en los márgenes de dichas placas. Un mapa tectónico general es mostrado en la figura 1.

Una de las fuentes principales de sismos es la fosa de subducción, asociada al límite de placas Cocos y Caribe. Dentro de ella cabe distinguir una zona de subducción superficial ($h = 50$ km), localizada a unos 120 km de la costa, donde la placa de Cocos comienza a sumergirse bajo la placa del Caribe, y otra de subducción intermedia y profunda ($h > 50$ km), localizada ya bajo el continente, llegando a profundidades de hasta 250 km. En conjunto, la zona de subducción representa la

fuentes de los mayores terremotos históricos ocurridos en Centroamérica, incluyendo Guatemala (Rojas *et al.*, 1993) y es la única fuente que tiene dimensiones laterales suficientes para generar un terremoto de magnitud $M_w = 8$ y la más alta frecuencia de eventos de $M_w > 7$ en toda la región (Villagrán, 1995).

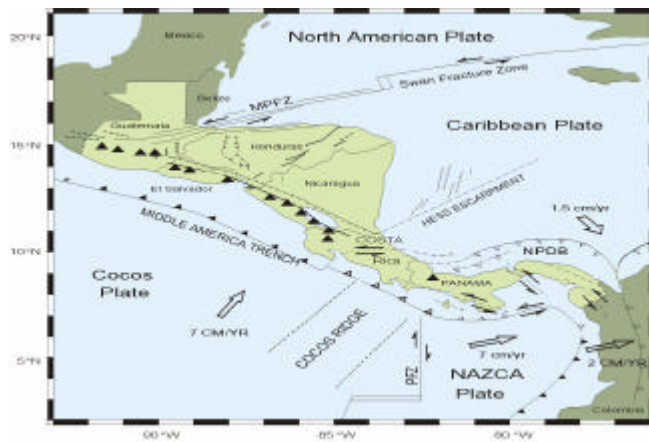


Figura 4.- Mapa tectónico de Centroamérica, con indicación de los mayores elementos estructurales. (De Villagrán *et al.*, 1997).

La segunda gran estructura a considerar es el sistema de fallas Chixoy-Polochic-Motagua, que se extiende desde la costa del Caribe hasta la frontera con México, y está asociado al límite de placas Norteamérica-Caribe. Las fallas están alineadas paralelamente en dirección ENE-WSW, y hay evidencia de terremotos producidos por complejos procesos de ruptura en ellas, con desplazamientos promedio hasta de 1 m. Algunos ejemplos son el sismo de 1976, de $M_w = 7.5$, en la falla de Motagua, o el de 1816 en Chixoy-Polochic, de M_w estimada entre 7.5 y 7.8 (Villagrán, 1995).

Otra importante fuente de actividad está relacionada con la cadena de volcanes en Centroamérica, que es paralela a la fosa de subducción y se extiende desde el Noroeste de México hasta el Sureste de El Salvador. Debido a fuerzas originadas por una componente de colisión oblicua en la zona de subducción, los terremotos originados en la cadena son generalmente considerados de origen tectónico (White, 1991), aunque en algunos casos han ido acompañados de erupciones volcánicas. Estos sismos han sido de magnitud moderada, $M_w < 6.5$, pero han causado gran destrucción, debido a que tienen foco superficial (profundidad menor que 25 km) y sus epicentros coinciden con centros de población.

Por otra parte, hay una cierta actividad sísmica asociada a la Depresión de Honduras, donde se presentan pequeños segmentos de fallas normales, que forman parte de una secuencia de grábenes en echelón (Bommer *et al.*, 1998). Estos terremotos son superficiales y poco frecuentes, pero pueden representar una fuente de amenaza para la zona limítrofe de Guatemala. Por último, la región de Petén tiene alguna actividad sísmica, pero en ella sólo se han producido eventos de pequeña magnitud, y con una tasa considerablemente menor que la de las zonas anteriores.

Las fuentes mencionadas tienen un potencial sísmico variable, pudiendo producirse en ellas terremotos de diferentes magnitudes máximas y con distintas leyes de recurrencia. Además, la atenuación también varía entre las distintas zonas, y los movimientos que se generan en ellas son de características bien diferenciadas, tanto en amplitud, como en contenido frecuencial y duración.

Teniendo en cuenta los condicionantes que concurren en la amenaza sísmica de la zona, se ha establecido una metodología basada en la definición de escenarios y la estimación independiente de la contribución de cada uno a la peligrosidad del territorio. Dicha metodología tiene por objetivo estimar los espectros de respuesta

asociados a los correspondientes movimientos en cualquier punto del territorio, que serán después comparados con los propuestos en el borrador del Código Sísmico de Guatemala (Normas Estructurales de Diseño y Construcción para la República de Guatemala, AGIES NR-1, 1999). El fin último es aumentar el conocimiento de la amenaza y establecer criterios sismorresistentes que sirvan de base para la adopción de una normativa en el país.

2. Metodología propuesta y estudio realizado

La metodología propuesta considera especialmente las características que determinan la peligrosidad de Guatemala, con fuentes de origen muy diverso, por lo que resulta idóneo el cálculo de la peligrosidad separando la contribución de diferentes escenarios, con la consiguiente caracterización del movimiento esperado por acción de cada uno de ellos. Esta metodología se establece con dos acepciones -probabilista y determinista-, con el fin último de estimar los espectros de respuesta correspondientes a los sismos máximos o esperados en cada escenario definido, siguiendo la línea de “desagregación” de la peligrosidad actualmente vigente. Una aplicación de la misma se ha desarrollado en Ciudad de Guatemala, en un emplazamiento genérico en roca, cuyos resultados se presentan en este trabajo.

En el **cálculo determinista**, cada escenario se caracteriza por un evento de cierta magnitud y localización, que se representará por un par magnitud-distancia (M, R). Siguiendo un criterio conservador, se tomará el máximo sismo potencial del conjunto de zonas que define el escenario, y se situará en el límite más próximo al emplazamiento de estudio. El par (M, R) se configura entonces con la magnitud máxima y la distancia mínima de la zona. El cálculo de espectros de respuesta representativos del movimiento de cada escenario se hará finalmente aplicando modelos de movimiento fuerte, en términos de aceleraciones espectrales, $SA(\omega)$, en función de M, R y un factor indicativo del tipo de suelo S.

En el **análisis probabilista** se efectuará un cálculo de la peligrosidad en cada emplazamiento, sumando la contribución de zonas dentro de un mismo escenario, y tratando a su vez los diferentes escenarios de manera independiente para la estimación de los correspondientes espectros característicos de los movimientos probables. El cálculo se realizará siguiendo la metodología de Cornell (1968), por medio del programa NPRISK (Dhale, 1994), que permite distintas opciones para cada paso, y la construcción del árbol lógico, cuantificando las incertidumbres.

En este análisis, cada zona dentro de un escenario debe ser caracterizada por su ley de recurrencia, la magnitud máxima y la magnitud mínima. Se aplicarán entonces leyes de atenuación de ordenadas espectrales, además de la PGA, y se determinará la peligrosidad en el emplazamiento, expresada por medio de estos parámetros. Como resultado de este análisis se obtendrán las curvas de peligrosidad por cada uno de los escenarios definidos y para cada frecuencia de interés. En un paso final, para cada escenario se calculará el espectro de respuesta asociado a una probabilidad fijada, tomando los valores de las ordenadas espectrales para esa probabilidad.

Cada espectro así construido representará el movimiento esperado en el emplazamiento, con la probabilidad fijada, debido a la acción sísmica de las fuentes englobadas en cada escenario. Esto permite comparar entre sí los espectros correspondientes a los diferentes movimientos, y establecer cuál resulta más determinante en cada rango de frecuencias, lo que supone evaluar qué escenarios representan mayor peligro para una determinada instalación.

2.1. Escenarios de Peligrosidad Definidos

Para el análisis de la peligrosidad, tanto determinista como probabilista, se ha partido del modelo de zonas sismogénicas definido por Ligorria (1995), mostrado en la figura 2.

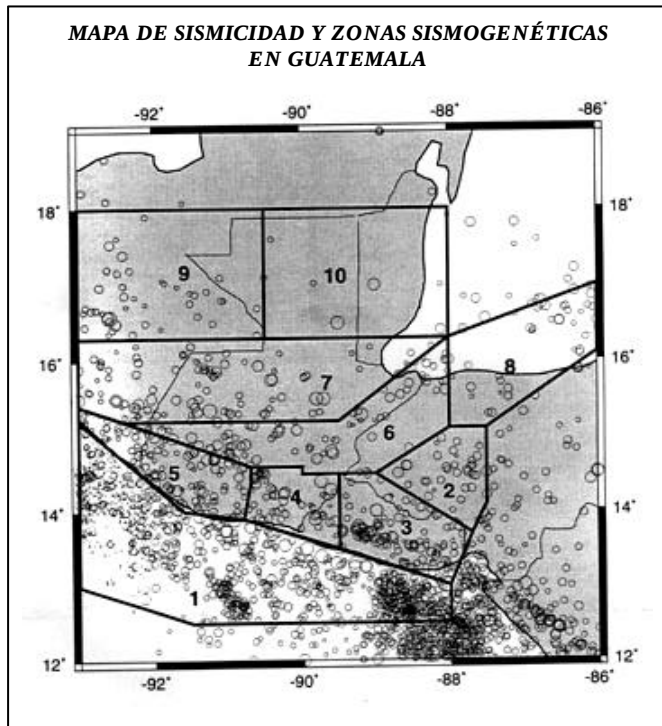


Figura 2.- Mapa de epicentros y zonas sismogénicas definidas por Ligorria (1995) en Guatemala.

Los escenarios de peligrosidad se han definido considerando las principales fuentes sismotectónicas en la región y las zonas sismogénicas se han reagrupado, de modo que cada escenario incluye aquellas zonas que tienen características similares, y que generarían un mismo tipo de movimiento en el emplazamiento. La definición hecha es la siguiente:

- Cadena volcánica: zonas 3, 4 y 5.
- Sistema de fallas Chixoy-Polochic-Motagua: zonas 6, 7 y 8
- Subducción superficial: zona 1
- Subducción intermedia-profunda: zonas 11 y 12
- Cuenca de Petén: zonas 9 y 10
- Depresión de Honduras: zona 2

Para cada zona se han tomado los parámetros de la ley de recurrencia, (α y β de la ley Gutenberg-Richter), junto con la magnitud máxima y la magnitud mínima estimados en el estudio de Ligorria et al (1995). Estas leyes son mostradas en la figura 3 donde puede observarse que varían mucho de un escenario a otro, hecho que tiene una importante trascendencia en el cálculo probabilista de la peligrosidad.

La gráfica nos da bastante información sobre la sismicidad de cada escenario definido, indicando en concreto que el mayor número de sismos para cada grado de magnitud se produce en las zonas de subducción, es decir en las zonas costeras. Después siguen en importancia las zonas de fallas Norteamérica-Caribe y las zonas volcánicas, donde el número de sismos registrados es menor que en las anteriores. Por último podemos ver que las recurrencias son bajas en la Depresión de Honduras y en Petén, y por ello estos escenarios van a contribuir poco a la peligrosidad.

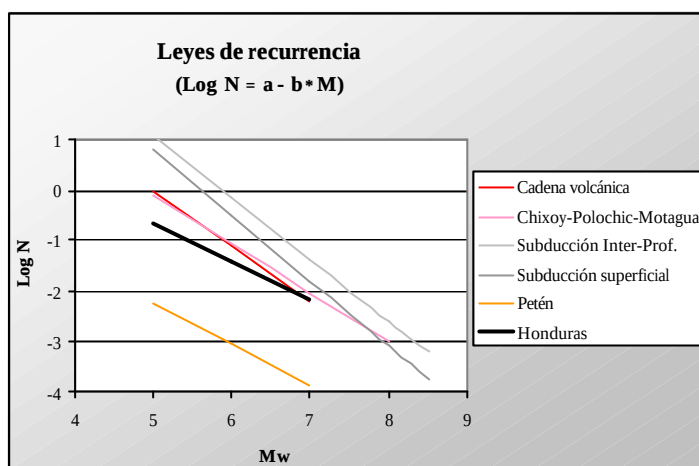


Figura 3.- Leyes de recurrencia de los diferentes escenarios de peligrosidad definidos en el estudio.

Una vez conocida la sismicidad de cada escenario, se procede a introducir las leyes de atenuación, para estimar el correspondiente movimiento en cada punto de estudio.

2.2. Leyes de Atenuación

Para esta parte del análisis se han recopilado leyes de atenuación formuladas con datos de Centroamérica, dado que no existen registros acelerométricos en Guatemala, para disponer de una ley de atenuación local.

Existen publicadas dos leyes o modelos de movimiento fuerte para la región. El primero, desarrollado por Climent et al. (1994) se ha deducido con datos de Costa Rica, México, Nicaragua y El Salvador y en principio resulta idóneo para nuestro estudio. Pero presenta el problema de establecer una única relación para todos los tipos de eventos sin distinguir sismos de subducción de otros más superficiales. El segundo modelo existente es el de Schmidt et al (1997), que es formulado con datos de Centroamérica, principalmente de Costa Rica. Este modelo distingue relaciones para eventos corticales y profundos de subducción, algo en principio más realista que la consideración de un único modelo. Por esta razón, en este estudio se ha adoptado este último como ley de atenuación, aunque se han contrastado también los resultados con otras leyes, y las diferencias no resultan muy significativas.

3. Resultados del cálculo de la peligrosidad en Ciudad de Guatemala

Como primeros resultados del **análisis probabilista** se han obtenido las curvas de peligrosidad para la aceleración máxima del movimiento, PGA, y para aceleraciones espectrales de distintas frecuencias, SA (ω), que representan el movimiento esperado en Ciudad de Guatemala (emplazamiento genérico en roca) para ciertos periodos de retorno. Por la metodología seguida, se obtienen diferentes curvas para los distintos escenarios que contribuyen a la peligrosidad, que son: Chixoy-Polochic-Motagua, Cadena volcánica, subducción intermedia-profunda y subducción superficial. La Depresión de Honduras y Petén no tienen influencia apreciable en la peligrosidad y por ello su contribución no ha sido representada.

Una descripción detallada de los resultados es incluida en el informe técnico de Benito, (2000). Cabe indicar ahora que para la aceleración pico, PGA, la mayor contribución la presentan los sismos de las fallas de Norteamérica-Caribe y Cadena volcánica, siendo considerablemente menor la influencia de la Subducción, tanto profunda como superficial. Este resultado era esperable, ya que en la aceleración

máxima, los sismos próximos y superficiales tienen generalmente más influencia que los de zonas más alejadas de subducción, aunque la sismicidad de éstas sea mayor. En la figura 4 se muestran las curvas de peligrosidad obtenidas para los distintos escenarios.

Otro hecho a destacar es que la subducción intermedia y profunda tiene mayor contribución a la peligrosidad que la superficial, con cualquiera de las leyes y parámetros ensayados. Este hecho, en principio sorprendente, puede explicarse por la mayor tasa de actividad de la subducción a profundidades mayores de 50 km, así como por la mayor distancia epicentral de la zona de subducción superficial al emplazamiento objeto de estudio. Los eventos de subducción intermedia-profunda, aunque tienen mayores profundidades están localizados bajo el continente, mientras que los de subducción superficial se localizan en el límite Cocos-Caribe, que se encuentra fuera de la costa. Por tanto, a efectos de atenuación, puede haber una compensación de la profundidad con la distancia, y lo que determina la mayor contribución de los eventos intermedios y profundos es la tasa.

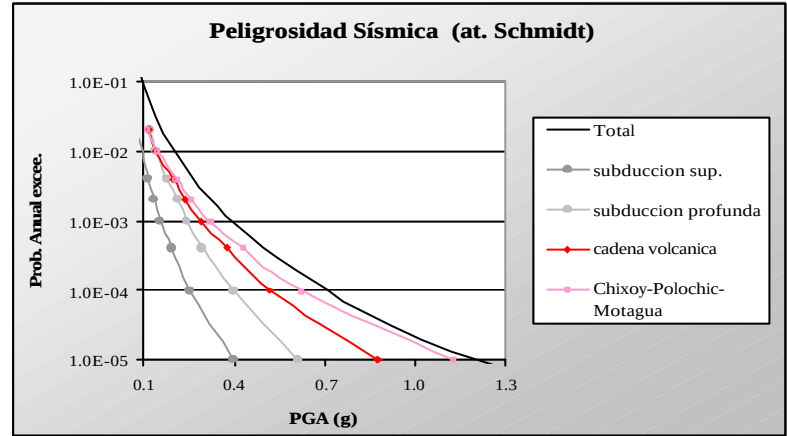


Figura 4.- Contribución a la peligrosidad sísmica en términos de PGA de los distintos escenarios.

Un resumen de los resultados obtenidos en el estudio para la PGA y diferentes periodos de retorno es presentado en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de PGA deducidos en el estudio para diferentes periodos de retorno, representando la peligrosidad total y la contribución por zonas

Periodo de retorno	Contribución de zona subducción	Contribución de zona cortical	Total
(años)	PGA (g)	PGA (g)	PGA (g)
10	0.07	0.06	0.09
50	0.12	0.14	0.16
100	0.14	0.18	0.20
500	0.21	0.29	0.31
1000	0.24	0.36	0.38
5000	0.34	0.56	0.57
10000	0.39	0.69	0.70

Los espectros de respuesta resultantes, correspondientes a los distintos escenarios se han representado para periodos de retorno de 50 y 500 años, con el fin de facilitar la comparación posterior con los establecidos en el borrador del código de Guatemala (AGIES NR-1, 1999) para los sismos frecuente y básico de diseño, asociados a esos periodos. Se muestran en las figuras 5a, y 5b, respectivamente.

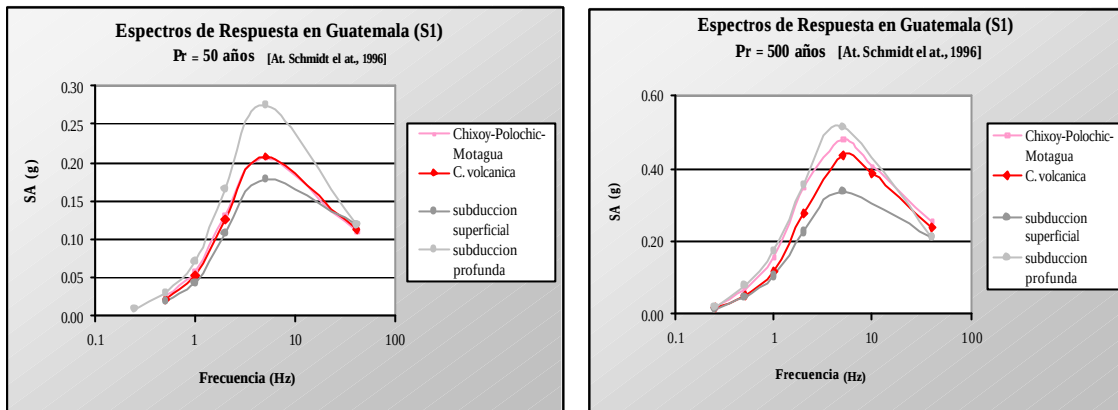


Figura 5. Espectros resultantes para los diferentes escenarios de peligrosidad
a) Periodo de retorno de 50 años **b)** Periodo de retorno de 500 años

Los espectros que resultan dominantes dependen del periodo de retorno elegido. Puede observarse que para periodos de retorno de 50 años domina el espectro correspondiente a la subducción intermedia y profunda, y es seguido del de Chixoy-Polochic-Motagua y cadena volcánica, prácticamente similares. Para 500 años de periodo de retorno sigue siendo dominante el espectro de subducción, pero se cruza con los otros dos para frecuencias superiores a 10 Hz.

Paralelamente se ha hecho un **estudio determinista**, tomando para cada escenario de peligrosidad el máximo sismo ocurrido, situado a la distancia mínima al emplazamiento. Los pares magnitud distancia característicos de los cuatro escenarios considerados, con influencia significativa en la peligrosidad, son:

- | | | | |
|----------------------------|-------------|--------------------|--|
| • Chixoy-Polochic-Motagua: | $M_w = 7,2$ | $R_{hip} = 35$ km | donde M_w representa
magnitud momento y R_{hip}
distancia hipocentral. |
| • Cadena volcánica: | $M_w = 6,5$ | $R_{hip} = 12$ km | |
| • Sub. Inter-prof.: | $M_w = 7,4$ | $R_{hip} = 112$ km | |
| • Sub. Superficial: | $M_w = 7,2$ | $R_{hip} = 152$ km | |

Se ha calculado el espectro correspondiente a cada par, pero a diferencia del método anterior, los espectros resultantes no representan movimientos esperados con una probabilidad o periodo de retorno, sino movimientos máximos en el emplazamiento por acción de cada escenario. Son mostrados en la figura 6.

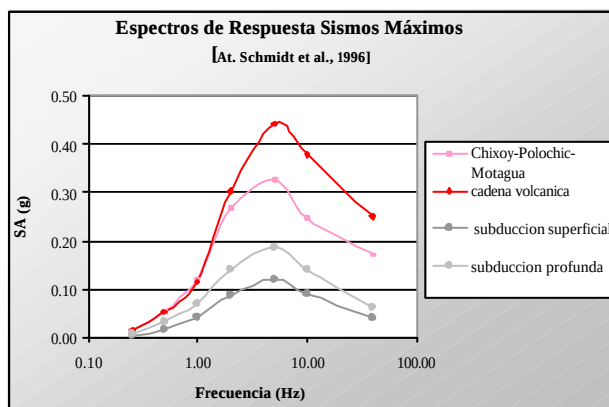


Figura 6.- Espectros de respuesta obtenidos por un método determinista, correspondientes a los sismos máximos de cada escenario de peligrosidad.

El resultado encontrado es notablemente diferente al obtenido por el método probabilista. El mayor espectro corresponde ahora a la cadena volcánica, seguido de Chixoy-Polochic-Motagua, y los procedentes de zonas de subducción son notablemente más bajos. Este resultado parece ser más acorde con los daños conocidos de terremotos recientes, que han resultado mayores para los terremotos ocurridos en las zonas corticales.

3.1. Comparación de espectros probabilistas y deterministas

Conviene interpretar cuidadosamente las discrepancias entre ambos métodos, que pueden indicar falta de completitud del catálogo utilizado, o introducción de leyes de recurrencia poco realistas, deducidas de intervalos de tiempo demasiado cortos.

Los detalles de la comparación son incluidos en el informe citado (Benito, 2000), pero cabe indicar, como hecho más relevante, que con la información de partida los espectros deterministas para zonas de subducción resultan infraestimados o bien los probabilistas sobrevalorados. Esto puede atribuirse a varias razones, que ponen de manifiesto la necesidad de estudios más completos en la zona. Primeramente, puede ocurrir que los sismos máximos de los que se tiene constancia, utilizados en el planteamiento determinista, no sean realmente los máximos creíbles de esos escenarios. Es posible que en estos se hayan producido sismos mayores en épocas remotas y que puedan esperarse también en el futuro.

Otra posible explicación es que esta magnitud máxima de zonas de subducción corresponda a un sismo característico, que deba ser contemplado fuera de la ley de recurrencia para la zona, hecho que sucede con frecuencia en zonas de subducción. En cualquier caso el resultado permite hacer una llamada de atención sobre las leyes de recurrencia y magnitudes máximas a considerar, en estas zonas, así como la necesidad de revisar el catálogo y corregir su falta de completitud. Los resultados son bastante coherentes para los sismos de cadena volcánica, por lo que la actividad de esta zona parece bien calibrada y controlada. Para las fallas Norteamérica-Caribe se observan discrepancias, aunque no excesivas, que indican también la conveniencia de revisar las magnitudes máximas asignadas.

3.2. Comparación con los espectros propuestos en normativas

Los espectros deducidos en el estudio para periodos de retorno de 50 y 500 años, se han comparado con los que resultan de la aplicación de la propuesta de código en Guatemala (AGIES NR-1, 1999) y de la Norma Española NCSE-94. Los espectros de estas normativas se construyen escalando una forma espectral estándar con los valores de la PGA que representa la peligrosidad total en el emplazamiento. Estos valores se han tomado de los resultados del estudio para la aceleración máxima PGA (tabla I), y son $PGA = 0,16 \text{ g}$ y $PGA = 0.31 \text{ g}$, para los dos periodos de retorno considerados. Estos corresponden al sismo de servicio (o frecuente) y al sismo base de diseño, según la propuesta de la Norma de Guatemala. Los resultados de la comparación se muestran en las figuras 7a y 7b, donde se deduce que todos los espectros son cubiertos por los propuestos en ambas normativas. Los espectros de éstas resultan conservadores, a la luz de los resultados de este estudio.

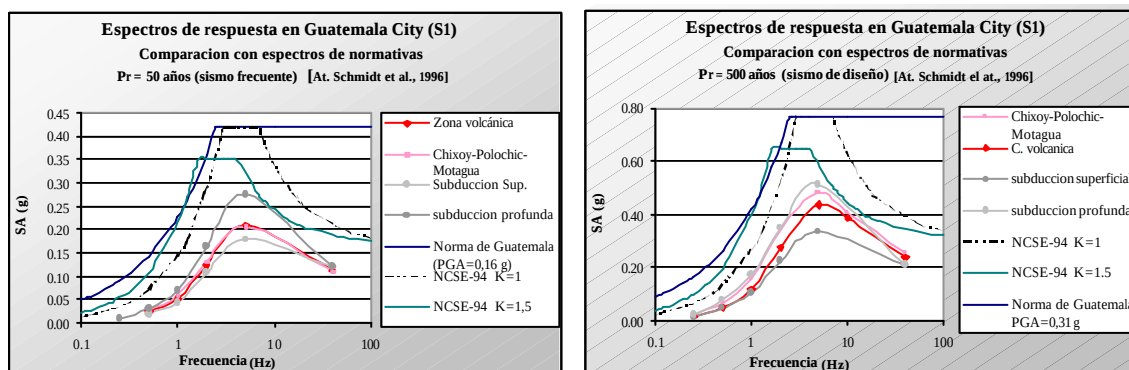


Figura 7.- Comparación de los espectros probabilistas deducidos en el estudio con los propuestos por las normativas de Guatemala y España, a) Sismo de servicio ($PGA=0.16 \text{ g}$) b). sismo de diseño ($PGA = 0.31 \text{ g}$)

4. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados y conclusiones del presente estudio aportan información que puede ser de interés para la adopción de un código sísmico en la República de Guatemala. Al mismo tiempo, el estudio ha puesto de manifiesto algunas cuestiones que deben ser investigadas con mayor detalle, para ahondar en el conocimiento de la peligrosidad y de las características de los movimientos esperados en cualquier punto del país.

Se ha establecido una metodología para estudios de amenaza sísmica en todo el territorio y se ha aplicado a Ciudad de Guatemala, lo que ha permitido evaluar las características de los movimientos que cabe esperar en la misma, por sismos ocurridos en las zonas con mayor contribución a la peligrosidad: Subducción de la costa del Pacífico, Zona del Altiplano (cadena volcánica) y Sistema de fallas Chixoy-Polochic-Motagua, asociadas al límite Norteamérica-Caribe.

Los mayores movimientos ocurridos (análisis determinista) se asocian a sismos de cadena volcánica, siendo después dominante la sismicidad del Sistema Chixoy-Polochic-Motagua y contribuyendo en menor medida los sismos de subducción. Estos resultados coinciden con el conocimiento de los daños reportados. Sin embargo, del análisis probabilista se deduce que en el futuro cabe esperar que se produzcan mayores movimientos que los registrados para la zona de subducción, lo que puede tener notable influencia en la peligrosidad de la ciudad. Para periodos de retorno menores de 1000 años, la influencia de la subducción intermedia-profunda resulta dominante en la parte del espectro de bajas frecuencias, mientras que para mayores periodos de retorno y altas frecuencias es mayor la contribución de Chixoy-Polochic-Motagua. En todos los casos, la influencia de la subducción intermedia y profunda resulta dominante sobre la subducción superficial, lo que puede explicarse por la más alta tasa de actividad de aquella zona.

Las discrepancias entre ambos análisis ponen de manifiesto que es recomendable la revisión del catálogo sísmico de Guatemala, fundamentalmente de los máximos sismos históricos, así como de las leyes de recurrencia, para tener mejor calibrada la sismicidad de las diferentes zonas y efectuar extrapolaciones más fiables para el futuro.

La aceleración máxima del terreno que puede esperarse, como resultado del análisis probabilista en ciudad de Guatemala (emplazamiento genérico en roca) es de $PGA=0.16\text{ g}$ (Periodo de retorno de 50 años) y $PGA=0.31\text{ g}$ (periodo de 500 años). Partiendo de estos valores se han construido espectros de diseño con las formas espectrales de la Norma Sismorresistente Española NCSE-94 y con la propuesta de Normativa redactada por la Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales (AGIES-1, 1999) , para periodos de retorno de 50 años (sismo frecuente) y 500 años (sismo de diseño). Los espectros resultantes con ambas normativas cubren a los deducidos en el estudio para todos los escenarios, por lo que resultan conservadores

Por ultimo, se recomienda hacer estudios similares en otras poblaciones del país, e impulsar la propuesta de la citada normativa, con el fin de convertirla en ley reguladora del diseño en la República de Guatemala.

5. Referencias

- AGIES NR-1, 1999. Normas estructurales de diseño y construcción para la República de Guatemala. Cap. 1,2 y 3.
- Benito, B.(2000). Metodología para la evaluación de la Amenaza Sísmica en Guatemala. Aplicación al Diseño Sismorresistente. Informe Técnico AEI-IGME.
- Bommer, J.; Salazar, W.; Samayoa, R. (1998) "Proyecto de prevención y mitigación de la contaminación municipal e industrial en el área del Gran San Salvador", Programa Salvadoreño de investigación sobre desarrollo y medio ambiente (PRISMA), pp 136.
- Climent, A.; Taylor, M.; Ciudad Real, M.; Strauch, W.; Villagran, M., Dhale, A.; Bungum, H. (1994), "Spectral strong motion attenuation in Central America", Technical Report Nº 2-16, NORSAR.
- Cornell, C.A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", BSSA, 58, pp 1583-1606.
- Dhale, A. (1994), "NPRISK: logic tree probabilistic earthquake hazard computation program. User Guide's , versión 1.1.
- Ligorria, J.P. (1995), "Some aspects of seismic hazard assessment in Guatemala: Crustal structure, attenuation, site response and regional seismic hazard", Master of Science Thesis, Institute of Solid Earth Physics, Univ. Bergen, Norway.
- NCSE-94. Norma de la construcción sismorresistente española, 1994. Real Decreto 2543/1994 de 29 de Diciembre por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación. BOE núm 33, miércoles 8 de Febrero de 1995, pp 3935-3980.
- Rojas, W.; Bungum, H.; Lindholm, C.D. (1993), "A catalog of historical and recent earthquakes in Central America", Report NORSAR, 77p.
- Schmidt, V., Dahle, A., and Bungum., H. (1997), "Costa Rica Spectral Strong Motion Attenuation", Technical Report, NORSAR, November 1997
- Villagrán, M.; Lindholm, C.; Dhale, A.; Cowan, H.; Bungum, H. (1997), "Seismic hazard assessment for Guatemala City", Natural Hazards 14, pp 189-205.
- Villagran, M. (1995), "Problems related to seismic Hazard in Central America: magnitude estimation, attenuation of seismic waves, seismic hazard assessment for Guatemala City and site response", Master of Science Thesis, Institute of Solid Earth Physics, Univ. Bergen, Norway.
- White, R.A. (1991), "Tectonic implications of upper-crustal seismicity in Central America", In: The Geology of North America, Decade map, Vol 1, pp 323-338.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido resultado de un proyecto de colaboración financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), a quien agradecemos su contribución. El trabajo se ha desarrollado en el INSIVUMEH de Guatemala, con ayuda del personal de Sismología cuyo agradecimiento queremos también hacer constar, así como a Juan Pablo Ligorria y Mario Villagrán por la importante información aportada y las valiosas sugerencias.