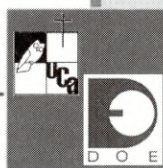


riesgos urbanos

WALTER SALAZAR - VÍCTOR SARDIÑA - KAZUOH SEO

Departamento de Organización del Espacio-/ UCA

Alicia Tenze - Lizeth Rodríguez
editoras



RIESGOS URBANOS

(3)

Este libro contiene los materiales más relevantes del tercer curso sobre Riesgos Urbanos "USO DEL SUELO Y RIESGO SISMICO", realizado en San Salvador del 6 al 13 de abril de 2005, que organizaron el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y el Departamento de Organización del Espacio (DOE).
Contando con el apoyo financiero y técnico del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

© DOE-UCA

Edición: Alicia Tenze - Lizeth Rodríguez

Portada: Lizeth Rodríguez

Hacia una micro-zonificación sísmica para San Salvador y otras ciudades en El Salvador

Walter Salazar

1. Introducción

EL CONCEPTO de micro-zonificación sísmica en El Salvador no es nada nuevo. Desde la década de los ochenta, se han hecho muchos intentos de proponer una micro-zonificación para San Salvador, desde estudios nacionales con carácter académico hasta propuestas concretas de amenaza sísmica por parte de consultoras extranjeras. La micro-zonificación sísmica es un mapa que refleja los distintos niveles de amenaza que desencadena el movimiento fuerte del terreno durante un terremoto. Esta amenaza puede ser la amplificación del movimiento sísmico que ocurre por la presencia de sedimentos por encima del estrato rocoso, o bien, el potencial de deslizamientos de tierra. Por tanto, por cada amenaza presente, debe realizarse un mapa de micro-zonificación. En este artículo, se hace énfasis en la amplificación del movimiento sísmico como detonante principal del colapso de las edificaciones. En primer lugar, se presentan conceptos fundamentales sobre el fenómeno de la amplificación y la resonancia. En segundo lugar, se citan los estudios más relevantes sobre la amplificación del movimiento sísmico en el área de San Salvador y las cargas sísmicas asociadas para el diseño de estructuras. En tercer lugar se ponen de manifiesto los trabajos de investigación pendientes de realizar para concluir una micro-zonificación adecuada a las necesidades y los recursos económicos para la práctica del diseño sismorresistente en nuestro país. Finalmente, se concluye con aspectos sobre la gestión técnico-política de una futura micro-zonificación sísmica para San Salvador y ciudades importantes en nuestro país.

2. Fenómeno de amplificación sísmica.

Todo movimiento sísmico sobre la superficie terrestre es el producto de tres factores: a) La fuente sísmica, b) el trayecto y c) el efecto de sitio (Figura 1).

La fuente sísmica esta asociada con la ruptura de una falla geológica, en donde se generan esfuerzos de corte en un volumen de roca liberándose una gran cantidad de energía en formas de ondas elásticas. Estas ondas viajan a través de la corteza terrestre, ocurriendo en su trayecto la atenuación, debido a la geometría de propagación y la absorción intrínseca de energía del material que atraviesan las ondas. Por tanto, el nivel de sacudida es mayor cerca de la fuente, que a una distancia considerable de ésta (por ejemplo 30kms). Estas ondas sísmicas llegan a un lecho rocoso que bien se encuentra sobre la superficie terrestre, o bien por debajo de un paquete de sedimentos; en este último caso las ondas sísmicas pasan instantáneamente de este lecho rocoso a los sedimentos, generándose un efecto de sitio conocido como fenómeno de amplificación. Este fenómeno ocurre primariamente por la diferencia de densidad entre la roca y el sedimento inmediato por encima de ella, y secundariamente, por el espesor del suelo medido desde el estrato rocoso hasta la superficie libre. Por tanto, el movimiento sísmico será mucho mayor sobre la superficie libre que sobre la roca (Figura 1).

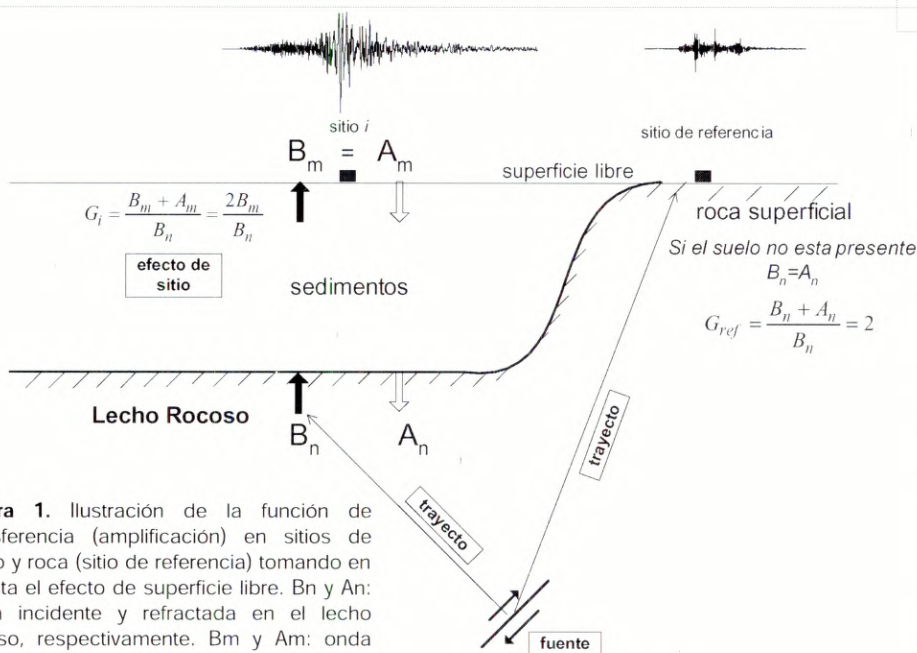


Figura 1. Ilustración de la función de transferencia (amplificación) en sitios de suelo y roca (sitio de referencia) tomando en cuenta el efecto de superficie libre. B_n y A_n : onda incidente y refractada en el lecho rocoso, respectivamente. B_m y A_m : onda incidente y refractada en la superficie, respectivamente.

Un punto esencial es qué se entiende por "roca" o "lecho rocoso". Por lo general, en ingeniería se utiliza la velocidad de propagación de ondas de corte VS como un parámetro para definirla. En San Salvador, el estudio de Faccioli et al. (1989) sugiere una velocidad VS de 2,100 m/s.

En varias partes del mundo la presencia de los sedimentos ha estado asociada con el nivel de daño en las edificaciones. Por ejemplo, el estudio de Salazar y Seo (2003) muestra la distribución de daños para los terremotos destructores del 13 de Enero y el 13 de Febrero de 2001, sugiriendo que los mayores daños ocurrieron en la zona de sedimentos más jóvenes a lo largo de El Salvador (Figura 2). Por tanto, el nivel de daños esta íntimamente relacionado con la amplificación para una región en particular. Es de esperarse que las edificaciones construidas sobre roca sufran menores daños que las construidas sobre estratos de suelo con espesores considerables, si ambos sitios se encontraran a una distancia similar de la fuente sísmica.

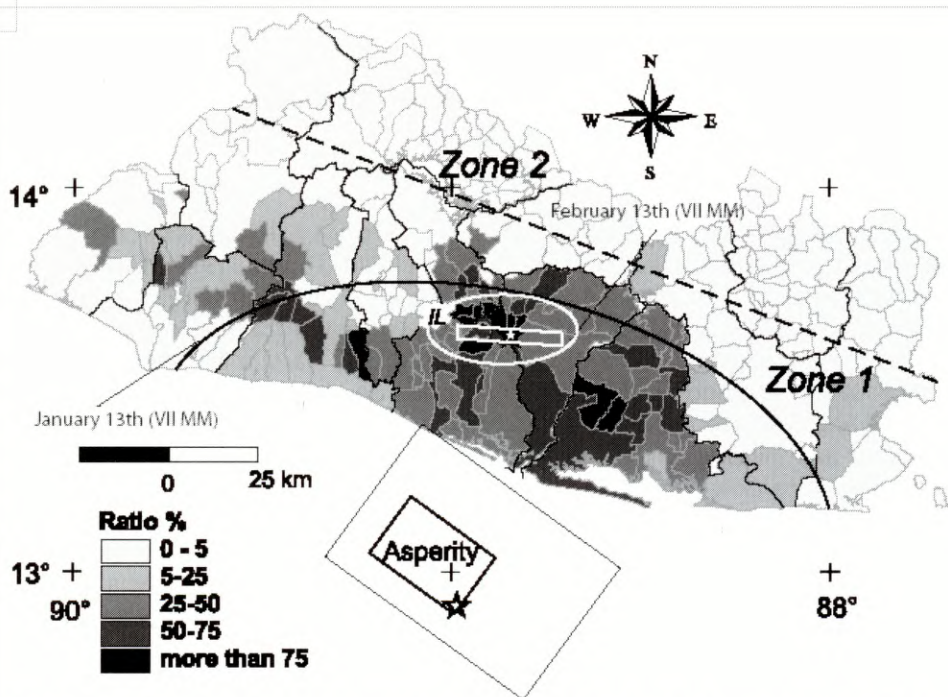


Figura 2. Razón de daños (casas colapsadas/total de casas) causadas por los eventos del 13 de Enero y 13 de Febrero de 2001. Base de datos del DIGESTYC (2001). Los soluciones de los epicentros y los mapas de isosistas de intensidad VII MM basados en CIG (2001). Las proyecciones de las rupturas de la falla en la superficie tomadas de JSCE (2001). La Zona 1 es considerada con mayor peligrosidad sísmica que la Zona 2 en el código sísmico de El Salvador. IL: Lago de Ilopango.

El período fundamental de vibración TS (en s) de una capa de suelo con espesor H y velocidad de ondas de corte VS, puede definirse como $TS=4H/VS$. El período TE (en s) de un edificio de marcos de concreto armado de n pisos puede calcularse inicialmente como $TE=0.1n$. Si se produce un terremoto y el edificio está situado por encima de una capa de sedimentos con período TS, y éste coincide con el período de vibración del edificio TE, se da el fenómeno de la resonancia, esto significa que, el edificio sufriría grandes desplazamientos que pueden hacer colapsar la estructura. Si por ejemplo, el espesor de la Tierra Blanca en una zona de San Salvador se estima de 30m, con una velocidad de ondas de corte de 240m/s, entonces el período de vibración TS de esa capa de suelo sería de 0.5s. La pregunta inmediata a responder sería qué tipo de edificaciones experimentarían el fenómeno de la resonancia si se construyeran en esta localización. Utilizando la fórmula para calcular el período TE, el número de pisos de un edificio con período de 0.5s es de cinco. Por lo tanto, sería recomendable construir edificaciones con una altura menor, o con una altura mucho mayor a los 5 pisos para evitar el colapso de las estructuras en esta zona ante una sacudida fuerte.

3. Estudios de Micro-zonificación para el Área Metropolitana de San Salvador.

El primer estudio de micro-zonificación en términos de amplificación puede adjudicarse a la Misión Geológica Alemana (Schmidt-Thomé, 1975). Este estudio fue realizado para proporcionar lineamientos de planificación urbana en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). El mapa de micro-zonificación proporciona los distintos espesores de Tierra Blanca en el AMSS. Ya que la Tierra Blanca fue depositada por el Lago de Ilopango hace miles de años (Aguilar, 2003), la zona Este del AMSS posee espesores mayores de 90m de este sedimento, donde se esperaría una amplificación considerable. Al Oeste de San Salvador puede encontrarse roca en la superficie.

El segundo estudio de micro-zonificación fue realizado por la Misión Geológica Italiana (Faccioli et al., 1989) a raíz del terremoto destructor del 10 de Octubre de 1986 en San Salvador. Este estudio pone de manifiesto la existencia de lava intercalada ($VS=2100$ m/s) entre la Tierra Blanca ($VS=250$ m/s) y las Tobas ($VS=500$ m/s). Salazar y Seo (2002) sugieren que esta intercalación de estos materiales rígidos y flexibles (Figura 3) genera que el segundo modo de vibración sea el modo predominante en la función de amplificación, o en otras ocasiones, todos los modos tengan el mismo nivel de amplificación. Esto induce a que las estructuras de mediano período (entre 0.3 y 0.7s) tengan mayor demanda sísmica y por ende puedan colapsar durante una sacudida fuerte (Salazar, 2003a).

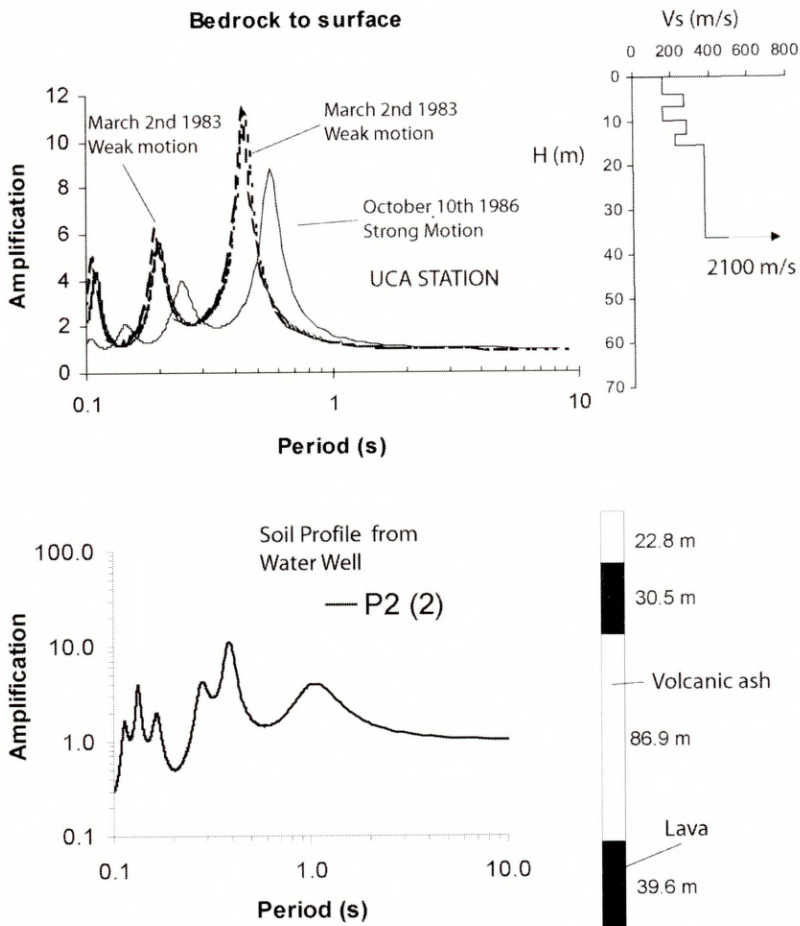


Figura 3. Factores de amplificación utilizado un modelo 1D de propagación de ondas SH. Arriba: Estación UCA en San Salvador considerando el efecto no -lineal en el comportamiento del suelo utilizando datos de "down-hole". Abajo: perfil de suelo con más de 100 m de profundidad. Los datos del suelo son tomados del estudios de Faccioli et al. (1989). La estación UCA está localizada en la Zona 1B y el perfil de suelo P2 esta localizado en la Zona 2 de la Figura 4.

El mapa que presenta el estudio Italiano es dividido en tres zonas de acuerdo al espesor acumulado de lava que se encuentra en los primeros 100m de profundidad (Figura 4). Estas zonas fueron propuestas en base a perfiles de suelo obtenidos de pozos de agua realizados por la Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), pruebas Standard Penetración Test (SPT), pruebas

down-hole para proporcionar las características dinámicas del suelo (velocidad de ondas de corte y amortiguamiento) y registros acelerográficos del terremoto del 10 de Octubre de 1986. También se utilizó la distribución de daños en edificaciones producidas por este sismo. Una característica de este estudio es que presenta por cada zona presente un espectro de respuesta a ser utilizado para el diseño de estructuras en San Salvador. Desgraciadamente, este estudio no ha sido tomado en cuenta para la demanda sísmica en los códigos de diseño en nuestro país.

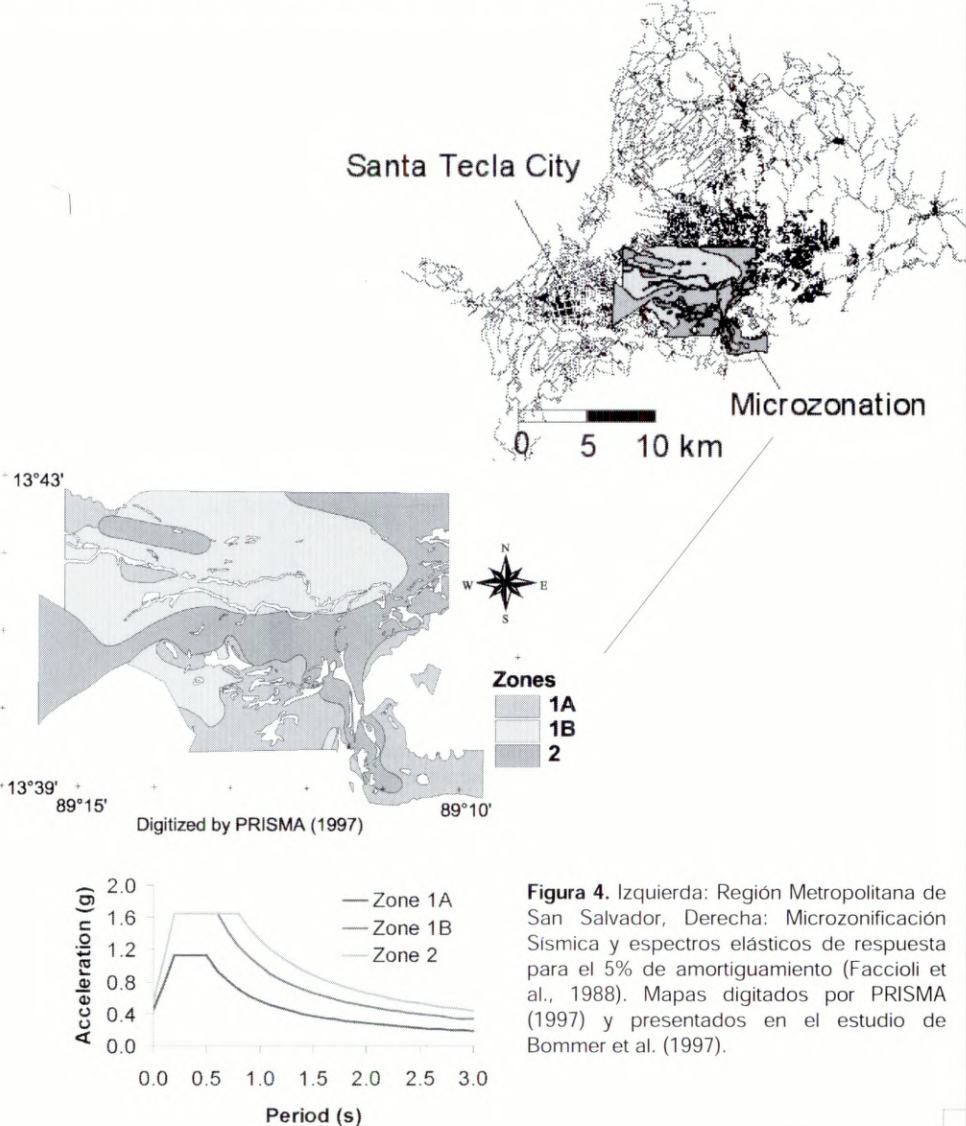


Figura 4. Izquierda: Región Metropolitana de San Salvador, Derecha: Microzonificación Sísmica y espectros elásticos de respuesta para el 5% de amortiguamiento (Faccioli et al., 1988). Mapas digitados por PRISMA (1997) y presentados en el estudio de Bommer et al. (1997).

4. Trabajo futuro y gestión técnico-política de la micro-zonificación sísmica.

Puede asegurarse que la elaboración de una microzonificación para la nueva y extendida Región Metropolitana de San Salvador (RMSS), es un trabajo que debe realizarse con carácter urgente, debido a las condiciones de actividad sísmica de nuestro país. Se proponen los siguientes pasos de investigación fundamentales para iniciar la micro-zonificación sísmica en San Salvador y otras ciudades importantes en El Salvador:

- a) Ordenamiento de los registros acelerográficos de las instituciones gubernamentales y privadas. La Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), y Geotérmica Salvadoreña (LAGEO), mantienen redes de instrumentos para registro de movimientos fuertes. Se debe realizar un esfuerzo por generar y divulgar anualmente una base de datos actualizada de los registros acelerográficos obtenidos. Estos registros representan la materia prima para obtener efectos de sitio (amplificación) para cada sitio en donde se encuentran instalados los instrumentos.
- b) Realización de mediciones de micro-trepidación. Se ha gestionado un proyecto de cooperación entre la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), la UCA, el SNET y el Instituto Tecnológico de Tokio para adquirir equipo para medir micro-trepidaciones¹. El objetivo primordial de la primera fase de este proyecto es realizar las mediciones de micro-trepidación en las estaciones acelerográficas citadas en el literal (a). De esta manera se estudiará si hay una relación entre los terremotos y las micro-trepidaciones. Si existe esta relación, se debe extrapolar el efecto de sitio a lugares circundantes de las estaciones acelerográficas midiendo la micro-trepidación en lugares de interés.
- c) Realización de pruebas *down-hole* para conocer las características dinámicas de los suelos (velocidad de ondas de corte y amortiguamiento), pruebas *SPT*, compilación de pozos de agua de ANDA que revelen la estratigrafía al menos a 100m de profundidad. Esta información corroboraría las funciones de amplificación obtenidas a través de los registros acelerográficos y las micro-trepidaciones.

¹ Micro-trepidación: micro movimiento en un punto determinado producido por el tráfico, maquinaria, actividad humana, etc. Se pretende estudiar el efecto de sitio (amplificación) mediante el estudio espectral de las señales obtenidas utilizando las tres componentes de movimiento, dos horizontales perpendiculares entre sí y una vertical.

- d) Realización de mediciones de arreglos de micro-trepidación vertical. Estas pruebas se realizarán en el mismo marco del proyecto citado en (b). El objetivo de la micro-trepidación vertical es obtener la velocidad de ondas de corte a varios kilómetros de profundidad por un método de inversión, y así obtener las funciones de amplificación en sitios de interés.
- e) Pruebas de refracción sísmica: estas pruebas se realizarán durante el mismo proyecto citado en (b). El objetivo de estos experimentos es obtener un perfil del suelo en detalle a pocos metros de profundidad. Esto complementa los perfiles de suelo obtenidos en (d).
- f) Estudios de peligrosidad sísmica tomando en cuenta los efectos de sitio. Una vez conocido el efecto de sitio a través de los datos y métodos citados en los literales anteriores, es posible obtener espectros de diseño para sitios específicos, teniendo una evaluación de la sismicidad a través de un catálogo sísmico (Salazar, 2003b) y ecuaciones de atenuación para el movimiento fuerte a nivel de roca para terremotos de subducción y cadena volcánica (Salazar, 2004).
- g) Recopilación de la distribución de daños debido a un sismo fuerte. Este es un aspecto sumamente importante, ya que dicha distribución se utiliza para validar una micro-zonificación cuando ocurre un terremoto destructor. Se esperaría que los mayores daños ocurran en la zona de mayor amplificación mostrada en el mapa.

El gran reto es utilizar las micro-trepidaciones como sustituto del movimiento sísmico. Idealmente, para micro-zonificar San Salvador, se tendrían que instalar acelerógrafos por cada kilómetro cuadrado, así como también obtener las características dinámicas del suelo por debajo del instrumento o en otros lugares. Ya que esto es económicamente imposible, debe iniciarse una investigación que permita utilizar las micro-trepidaciones como una herramienta para pronosticar el futuro movimiento del terreno durante un evento sísmico.

Posterior a la investigación es de vital importancia, asegurar que estos estudios tengan una incidencia en el futuro código sísmico de El Salvador. Actualmente, no existe micro-zonificación en las normativas sismorresistentes de nuestro país, ni mucho menos la demanda sísmica que estaría asociada a cada zona, a pesar de que el estudio de la Misión Italiana fue realizado con este propósito. El problema esencial radica en cómo realizar una gestión técnico-política para que estas futuras micro-zonificaciones sean incluidas en las reglamentaciones para el diseño sismorresistente. Automáticamente, un estudio de esta índole cambiaría el precio de la tierra y los inmuebles, afectando y beneficiando a muchos. Las primeras preguntas de un ciudadano serían: ¿En qué zona me encuentro viviendo o

trabajando? ¿Qué sucede si dicho mapa de micro-zonificación señala que mi familia vive en la zona de mayor amplificación en San Salvador? ¿Qué sucede con el valor de la casa que he comprado durante todos estos años? ¿Qué medidas tomarán las aseguradoras al saber que ellos cubren un seguro en la zona de mayor amenaza en la ciudad? ¿Que haría Ud. si la micro-zonificación sísmica revela que su edificio de 5 niveles no es capaz de resistir la demanda impuesta por un futuro terremoto debido al fenómeno de la resonancia?

Estas preguntas ponen de manifiesto que la tarea de mitigar el riesgo sísmico es multidisciplinaria. Tanto profesionales, ingenieros, arquitectos, científicos, economistas, como políticos, urbanizadores, empresas de seguros, etc., deben aportar sus conocimientos a la tarea de minimizar las consecuencias de un futuro terremoto en las ciudades importantes de El Salvador. Pero además de las preguntas antes citadas, existe otra que preocupa mucho más a los involucrados en esta tarea: ¿Por qué es necesaria una micro-zonificación en San Salvador si ya existen construcciones? Idealmente, un estudio de esta envergadura debe realizarse en una zona donde se vaya a construir y que sea parte esencial de la planificación urbana y del uso de suelo. A mi criterio, esta micro-zonificación señalaría qué edificaciones habría que reforzar para generar una capacidad estructural adecuada para resistir la demanda impuesta definida por la amplificación sísmica.

Otro punto importante es la vigilancia del código sísmico. ¿Qué institución vela por el cumplimiento de las normas de diseño sismorresistente en El Salvador? Una micro-zonificación debe estar plasmada en el futuro código sísmico, pero debe asegurarse que la demanda estructural por cada zona sea utilizada y respetada. De no ser así, este vacío crearía el incumplimiento indefinido de las normativas de construcción antisísmica, poniendo en peligro a la población, o en su defecto, generando costos innecesarios. Además, se induce a más desorden en el ámbito de la consultoría estructural en el país, ya que cada quién evaluaría las cargas de diseño arbitrariamente, muchas veces utilizando cargas sísmicas provenientes de códigos extranjeros. En el código sísmico salvadoreño actual, la evaluación de las cargas sísmicas (espectro de diseño) depende de la velocidad promedio de las ondas de corte (V_s) en los primeros 30m de profundidad, pero, ¿Qué empresa o que proyecto tiene en su presupuesto obtener las características dinámicas de los suelos hasta estas profundidades? Los estudios de suelo en el país se limitan a pruebas SPT para recomendar remoción o estabilización de suelos para efectos de diseño de cimentaciones, pero no para evaluar cargas sísmicas de diseño para toda la edificación, las cuales dependen de todo el espesor de suelo presente en el sitio de interés.

Por otro lado, el rol de las universidades en El Salvador es primordial para el desarrollo y formación de jóvenes expertos en el área de Ingeniería Sísmica. Actualmente la Universidad Centroamericana UCA, ofrece materias de carácter obligatorio y optativas técnicas de Ingeniería Sísmica, Ingeniería Estructural y Sismología que van de la mano con las investigaciones actuales en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) situado en el Campo Universitario, y el futuro proyecto de micro-zonificación que se realizará con instituciones gubernamentales y el gobierno de Japón.

5. Referencias Bibliográficas

- Aguilar, C. (2003) Formulación del plan de desarrollo territorial de la subregión de La Libertad. Estudio Geológico León Sol Arquitectos Consultores, S.A. de C.V.
- Bommer., J., W. Salazar & R. Samayoa (1997) Riesgo sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. Report prepared for USAID, PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación sobre el Medio Ambiente), San Salvador, 128 pp.
- CIG (2001) Centro de Investigaciones Geotécnicas, Ministerio de Obras Públicas, El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/>
- DIGESTYC (2001) Censo de Viviendas afectadas por la actividad sísmica del 2001. Dirección General de Estadísticas y Censos, El Salvador. Ministerio de Economía.
- Faccioli, E., C. Battistella, P. Alemani & Tibaldi (1988) Seismic microzoning investigations in the Metropolitan area of San Salvador, following the destructive earthquake of October 10, 1986. Proceedings, Int. Seminar on Earthquake Engineering, Universitat Innsbruck, Austria, 28-65.
- JSCE (2001) The 13 January 2001 off the coast of El Salvador earthquake. Investigation of damage to civil engineering structures, buildings and dwellings. Japan Society of Civil Engineers.
- PRISMA (1997) Perfil ambiental de la Región Metropolitana de San Salvador. Sponsored by USAID, San Salvador, El Salvador. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente.
- Salazar, W. & K. Seo (2002) Spectral amplification characteristics in San Salvador City (El Salvador) for upper-crustal and subduction earthquakes. The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium (JAEE) P065, pp. 329-334.
- Salazar, W. (2003a) Seismology and Earthquake Engineering in El Salvador. IASPEI Handbook of Earthquakes and Engineering Seismology. National Reports, Volume B, Chapter 79.19, 33 pp.. Ed. William Lee, H. Kanamori P. Jennings and K. Kisslinger.
- Salazar, W. (2003b) Seismic catalogue for El Salvador 1898-2001. UCA Editores, Colección Estructuras y Procesos, Serie Mayor Vol. 21 ISBN 99923-34-44-4.
- Salazar, W. & K. Seo (2003) Earthquake disasters of 13 January and 13 February 2001, El Salvador. Seismological Research Letters, Vol.74, No. 4., pp.420-439.
- Salazar, W. (2004) Evaluation of source, path and site effects on earthquake ground motions using an inversion technique for subduction and upper-crustal earthquakes in El Salvador, Central America. Doctoral Thesis. Tokyo Institute of Technology, Japan.
- Schmidt-Thomé, M. (1975) The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America): a basis for city development and planning. Geologisches Jahrbuch, 13, pp. 207-228.

Agradecimientos

El autor agradece al Doctor Jon de Cortina (Q.D.D.G.) por haber fundado la carrera de Ingeniería Civil en la UCA y dar apoyo a muchas personas para continuar los estudios en el campo de la Ingeniería Sísmica. A través de él fue posible formular proyectos de investigación que han permitido que el personal de la UCA haya sido capacitado en este campo. Así mismo agradezco al Arq. Mario Lungo (Q.D.D.G) por haberme apoyado en mis estudios de Postgrado, conjuntamente con el Doctor Jon de Cortina. Así mismo se agradece la visita y el tiempo invertido por el Dr. Kazuoh Seo del Instituto Tecnológico de Tokio y el Dr. Victor Sardiña del Centro de Alerta de Tsunamis en Hawai; gracias por su excelente colaboración con sus ponencias y escritos para este III Curso de Riesgos Urbanos. Finalmente agradezco al Arq. Ricardo Ramos y al Arq. Herbert Granillo del Depto. de Organización del Espacio de la UCA por su trabajo en equipo para coordinar este valioso curso.