

PRINCIPALES RESULTADOS Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS

MICHAEL SCHMITZ¹, JULIO J. HERNÁNDEZ², CECILIO MORALES¹, JEAN DOMÍNGUEZ¹, VÍCTOR ROCABADO¹, MAXLIMER VALLEÉ¹, MAURICIO TAGLIAFERRO¹, ÉLISE DELAUAUD³, ANDRÉ SINGER⁴, EDUIN AMARÍS¹, DANNA MOLINA¹, MORALIS GONZÁLEZ¹, VICTORIA LEAL¹ Y EL GRUPO DE TRABAJO DEL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS

¹FUNVISIS, final calle Mara, Urb. El Llanito, Caracas, Venezuela, correo-e: mschmitz@funvisis.gob.ve

²Consultor en Ingeniería Sísmica y Estructural, Caracas, Venezuela, correo-e: julher@cantv.net

³IPGP Paris; ahora: Univ. Potsdam, Alemania, correo-e: delavaud@geo.uni-potsdam.de

⁴Consultor para FUNVISIS, Caracas, Venezuela, correo-e: singer.andre1@gmail.com

Recibido: octubre de 2009

Recibido en forma final revisado: julio de 2011

RESUMEN

La ciudad de Caracas ha sufrido varios terremotos destructivos durante su historia, de los cuales el más reciente, el de 1967 con una magnitud de 6,6, causó el colapso de 4 edificios. A través de estudios multidisciplinarios, se evidenciaron importantes efectos de sitio en el valle de Caracas, que indican que los grandes espesores de sedimentos son parcialmente responsables de los daños ocurridos. Dicha situación motivó la ejecución del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas entre los años 2005 y 2009, en el cual se realizaron amplias investigaciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas y geofísicas para determinar la distribución de las diferentes unidades geológicas dentro del valle, incluyendo la perforación de pozos profundos y posteriores desarrollos de ingeniería sísmica. Para las zonas de laderas, el peligro de deslizamientos fue estimado basándose en información geotécnica disponible y modernos métodos calibrados experimentalmente. Se realizó un análisis actualizado de la amenaza sísmica en roca, el cual fue utilizado como un insumo para la determinación de los espectros de respuesta en los diferentes tipos de sitios en función del espesor de los sedimentos y la calidad del suelo superficial (V_s30). Los resultados del análisis dinámico 1D han sido calibrados con espectros de terremotos reales y comparados con normas internacionales; luego se consideraron efectos 2D-3D de la cuenca de Caracas, así como efectos topográficos. Toda la información recopilada y generada en el marco del proyecto se maneja en un Sistema de Información Geográfico (SIG) que permite la implementación de las recomendaciones y actualización de la información por parte de las instituciones locales.

Palabras clave: Caracas, Venezuela, Microzonificación sísmica, Espectros de respuesta, Peligro de deslizamientos.

PRINCIPAL RESULTS AND RECOMMENDATIONS OF THE CARACAS SEISMIC MICROZONING PROJECT

ABSTRACT

Caracas has suffered during its history several destructive earthquakes, and the most recent one in 1967 with a magnitude of 6.6 caused the collapse of 4 buildings. By means of multidisciplinary studies, important site effects were evidenced in Caracas valley, pointing to the big sedimentary thickness as partially responsible for the damages. This situation motivated the development of Caracas Seismic Microzoning Project in the years 2005-2009. Broad geological, geotechnical and geophysical investigations were carried out to determine the distribution of the different geological units in the valley, including deep drillholes and subsequent earthquake engineering investigations. For slope areas earthquake-induced landslide hazard was estimated based on available geotechnical information and modern methods (Newmark's method and Arias intensities) and calibrated experimentally. An up to date analysis of the seismic hazard in bedrock was used as an input for the determination of response spectra at different types of sites depending on the sediment thickness and the soil quality of the upper 30 m (V_s30). The results of the 1D dynamic analysis have been calibrated with spectra from real earthquakes, and compared to international codes; then, Caracas 2D-3D basin effects, as well as topographic ones, were considered. All the information is available in a Geographic Information System (GIS), which permits the implementation of the recommendations and the actualization of the information by local institutions.

Keywords: Caracas, Venezuela, Seismic microzoning, Response spectra, Landslide hazard.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Caracas está sometida a una amenaza sísmica elevada, debido a su cercanía al límite entre las placas tectónicas Caribe y Suramérica, donde existe una zona de interacción compleja, que comprende una banda de más de 100 km de ancho de actividad con los sistemas de fallas de La Tortuga, San Sebastián, Tacagua-El Ávila y La Victoria (de norte a sur; Beltrán, 1994; Audemard *et al.* 2000). La ciudad de Caracas está localizada precisamente en esta zona, en una cuenca tipo semi-graben que fue llenado de sedimentos (Singer, 1977) y que es bordeada por relieve montañoso escarpado, ambos ambientes densamente urbanizados con 3,2 millones de habitantes en la actualidad (INE, 2002).

A lo largo de la historia, Caracas ha sufrido varios terremotos destructivos (Grases, 1990). El más reciente fue el terremoto de Caracas de 1967, de magnitud 6,6, como un terremoto multi-evento (Suárez & Nábělek, 1990), cuyo principal sub-evento tuvo su epicentro 25 km al norte de Caracas. Este terremoto causó daños a numerosas edificaciones, entre ellos el colapso de cuatro edificios ubicados en el este del valle de Caracas con un saldo de más de 300 personas muertas (Briceño *et al.* 1978). Posterior al terremoto se desarrollaron investigaciones en detalle sobre los daños de las edificaciones, incluyendo características dinámicas de las estructuras, suelos superficiales y depósitos sedimentarios, vistos como factores fundamentales de la distribución de daños (Whitman, 1969; Seed *et al.* 1970; Arcia *et al.* 1978; figura 1).

El comportamiento particular de los sedimentos depositados en el este del valle de Caracas ha sido objeto de atención durante las décadas pasadas, destacando los estudios detallados de la respuesta sísmica y las características del movimiento del terreno (Papageorgiou & Kim, 1991; Abe-ki *et al.* 1998; Semblat *et al.* 2002; Rocabado *et al.* 2006). La norma de construcciones sismorresistentes (COVENIN, 2001) no considera parámetros importantes para la respuesta sísmica como son los espesores sedimentarios al basamento y la geometría de la cuenca sino el espesor hasta el estrato de roca ingenieril de $V_s > 500$ m/s.

En el “Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas”, ejecutado recientemente en la ciudad de Caracas por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) en cooperación con las contrapartes nacionales, se analizaron varios escenarios para desastres asociados con terremotos (Yamazaki *et al.* 2004; 2005). Sin embargo, los efectos producidos en relación con la cuenca y observados durante el terremoto de Caracas de 1967, no pudieron modelarse rigurosamente y se evidenció la necesidad de complementar la información existente en el subsuelo de Caracas con nuevos estudios. Esta labor, ya propuesta y comenzada desde antes (Schmitz, 2002; Schmitz *et al.* 2002), se realizó en los años 2005-2009 con el “Proyecto de Microzonificación Sísmica de las ciudades de Barquisimeto y Caracas”, financiado con aportes del programa FONACIT- BID II (FONACIT 200400738). El objetivo fundamental del proyecto fue la identificación de zonas de similar respuesta ante los movimientos sísmicos, de manera de poder ajustar el diseño de

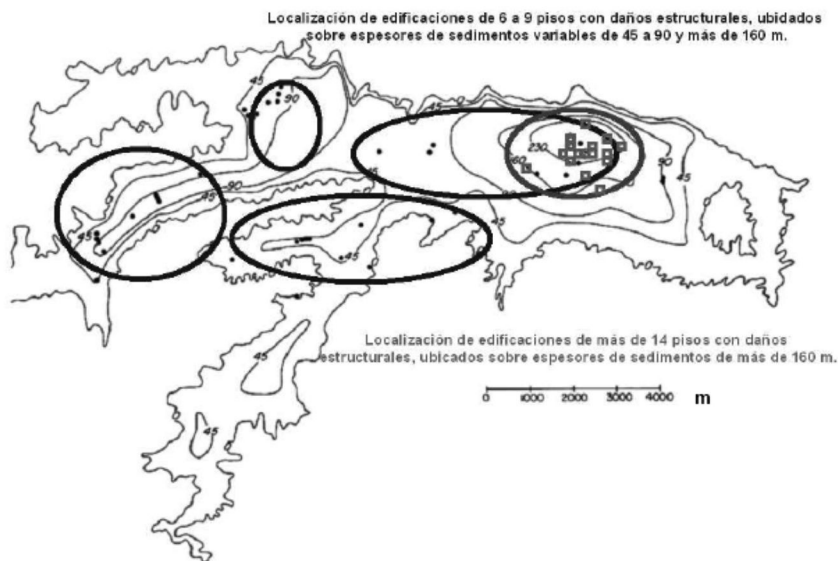


Figura 1. Distribución de daños del sismo de Caracas de 1967 (Arcia *et al.* 1978; Seed *et al.* 1970). Las isolíneas representan el espesor de los sedimentos y delimitan el valle sedimentario de Caracas. Los círculos indican las áreas con daños para edificios medianos (puntos; círculos negros) y altos (rectángulos; círculo gris oscuro).

las edificaciones a la diversidad de escenarios en la ciudad y de esta manera contribuir a la mitigación del riesgo sísmico en la capital venezolana. La definición de las microzonas requiere de la incorporación de la información de carácter geológico, sismológico, geofísico y geotécnico, adecuadamente procesada e integrada (Hernández *et al.* 2006). Su desarrollo conllevó un conjunto de actividades que requirió la participación de diferentes disciplinas científicas y técnicas de forma integrada, así como el manejo coordinado de la información en un Sistema de Información Geográfico (SIG), que permite la utilización y actualización futura de la información elaborada.

En este trabajo se presenta un resumen de la metodología empleada en el proyecto, así como los principales resultados de las evaluaciones del subsuelo que permitan la delimitación de microzonas de similar respuesta sísmica, a las cuales se asocia para cada sitio un espectro de diseño característico derivado de modelos dinámicos tipificados y calibrados para las diferentes microzonas identificadas, y la aplicación de una metodología de evaluación de susceptibilidad a movimientos en masa de las laderas, realizando calibraciones importantes de la metodología (Hernández *et al.* 2008). Es importante que esta información sea incorporada eficientemente en la elaboración de recomendaciones que se podrán introducir en el futuro en ordenanzas municipales. La aplicación de los resultados del proyecto en el Área Metropolitana de Caracas, permitirá ajustar la tipología de edificaciones a la diversidad de escenarios en la ciudad y de esta manera contribuir a la mitigación del riesgo sísmico.

METODOLOGÍA

La estimación del movimiento del suelo en diferentes áreas de una ciudad constituye una herramienta eficiente para la mitigación del riesgo sísmico, siendo las amplificaciones de sitio un factor preponderante para el comportamiento local (Bard, 1999). La metodología utilizada en el presente trabajo está descrita en líneas generales en Hernández *et al.* (2006). A continuación se presenta un resumen de la metodología utilizada en el estudio y los principales resultados obtenidos, los cuales se detallan en las respectivas secciones. El objetivo de la microzonificación sísmica es definir los niveles de amenaza sísmica y los efectos locales probables.

El estudio se basa en un conjunto de investigaciones previas (Briceño *et al.* 1978; Kantak *et al.* 2005; Yamazaki *et al.* 2005; Rocabado *et al.* 2006). Con base en los resultados del estudio, deben emprenderse acciones concretas que permitan traducir los conocimientos adquiridos en reducción del riesgo sísmico, mediante su implementación en ordenanzas y planes activos municipales (Martínez, 2006), que permi-

tan la planificación del uso de los terrenos, la adecuación de construcciones existentes y el diseño de las nuevas según la respuesta sísmica esperada en cada microzona.

En el proyecto de microzonificación sísmica se evaluaron un conjunto de factores para determinar los movimientos que se esperan en un sitio para un escenario específico, y se utilizaron los siguientes análisis:

1) Caracterización de la fuente: sismicidad histórica, análisis neotectónico, paleosismológico, sismológico y sismogénico diferenciado.

2) Evaluación probabilística de la amenaza sísmica en afloramiento rocoso; variación de la amenaza dentro de la zona de estudio (de sur a norte de Caracas). Esta variación de la amenaza se consideró en la amplitud de los espectros de respuesta tipificados.

3) Estudio paramétrico de respuesta dinámica 1D usando análisis equivalente lineal con el programa SHAKE (Schubel *et al.* 1972), variando el espesor de sedimentos (entre 10 y 350 m) y la velocidad promedio de ondas de corte de los primeros 30 m (V_{s30} entre 150 y 650 m/s), los cuales se agruparon dentro de 12 clases (Tabla 1) de acuerdo con su comportamiento típico. Los resultados dinámicos están calibrados y corregidos mediante su comparación con espectros de terremotos reales (PEER, 2005) y con funciones de transferencia experimentales.

Tabla 1. Grupos de perfiles de suelos genéricos (GP) usados para estimar la respuesta dinámica de sitios sedimentarios y microzonas asociadas para la macrozona CN (Figuras 8 y 10) entre corchetes.

H, depósito (m)	$V_{s,30}$ (m/s)		
	≤ 185	185 a 325	> 325
< 60	GP-01 [3-3]	GP-02 [3-2]	GP-03 [3-1]
60 a 120	GP-04 [---]	GP-05 [4-2]	GP-06 [4-1]
120 a 220	GP-07 [---]	GP-08 [5]	GP-09 [5]
> 220	GP-10 [---]	GP-11 [6]	GP-12 [6]

4) Efectos generales de sitio: inclusión de efectos 2D-3D de cuenca y de la topografía.

5) Definición de microzonas de respuesta sísmica similar. Para ello, se añadieron varias fuentes de información, como el análisis geomorfológico, geológico y geofísico de los sedimentos en el valle, el análisis de las rocas expuestas en laderas, la evaluación de la topografía y el análisis de los daños reportados durante el terremoto de Caracas de 1967.

6) Fuera de las áreas sedimentarias, el peligro de movimientos en masa activados por terremotos ha sido evaluado usando información geológica, geotécnica, geomorfológi-

ca, de pendientes y modificaciones antrópicas, mediante índices cuantitativos. Los resultados permiten identificar las áreas de mayor prioridad para intervención.

7) El estudio incluye la evaluación de edificaciones existentes respecto a su comportamiento estructural típico, orientada a establecer prioridades para su reforzamiento según su localización en las diferentes microzonas.

La información generada dentro del proyecto ha sido incorporada en un Sistema de Información Geográfico (SIG), el cual permitirá la interacción con las instituciones locales y planificadores urbanos para la rápida implementación de las recomendaciones. Asimismo, la interacción con las comunidades locales está organizada por el “Aula Sísmica Madeleilis Guzmán” de FUNVISIS, cuyo esfuerzo se enfoca en la educación de prevención de desastres.

PRINCIPALES RESULTADOS

Determinación del modelo geológico/geofísico del valle de Caracas

Los análisis y las evaluaciones que se desarrollaron para determinar la respuesta sísmica en el Área Metropolitana

de Caracas (AMC), requieren de la interacción de las diferentes disciplinas que conforman el grupo de trabajo, de tal manera, que se permita evaluar conjuntamente los diferentes factores que determinan la respuesta sísmica. Esta información se documenta en mapas temáticos que contienen la información elaborada por cada disciplina (tal como sísmica, geología, velocidades sísmicas, densidades, entre otras) y se integra en los mapas de microzonificación sísmica que contienen las características principales de la zona de estudio, junto con recomendaciones para su aplicación. En el presente estudio se hizo especial énfasis en la relación entre la geología, las características geofísicas de los depósitos y la respuesta dinámica que generan, para asociar los espectros tipificados con cada microzona. La base para la delimitación de las microzonas la constituye la cartografía geológica y geomorfológica de las principales formaciones geológicas y unidades geomorfológicas, en conjunto con la información sobre los espesores de sedimentos y las velocidades sísmicas de los estratos someros. Al mapeo de las principales unidades geológicas se agrega el análisis de la distribución de sedimentos cuaternarios (Singer *et al.* 2007; figura 2), que permiten delimitar los límites de la cuenca sedimentaria, así como la conformación de los diferentes unidades cuaternarias dentro del valle.

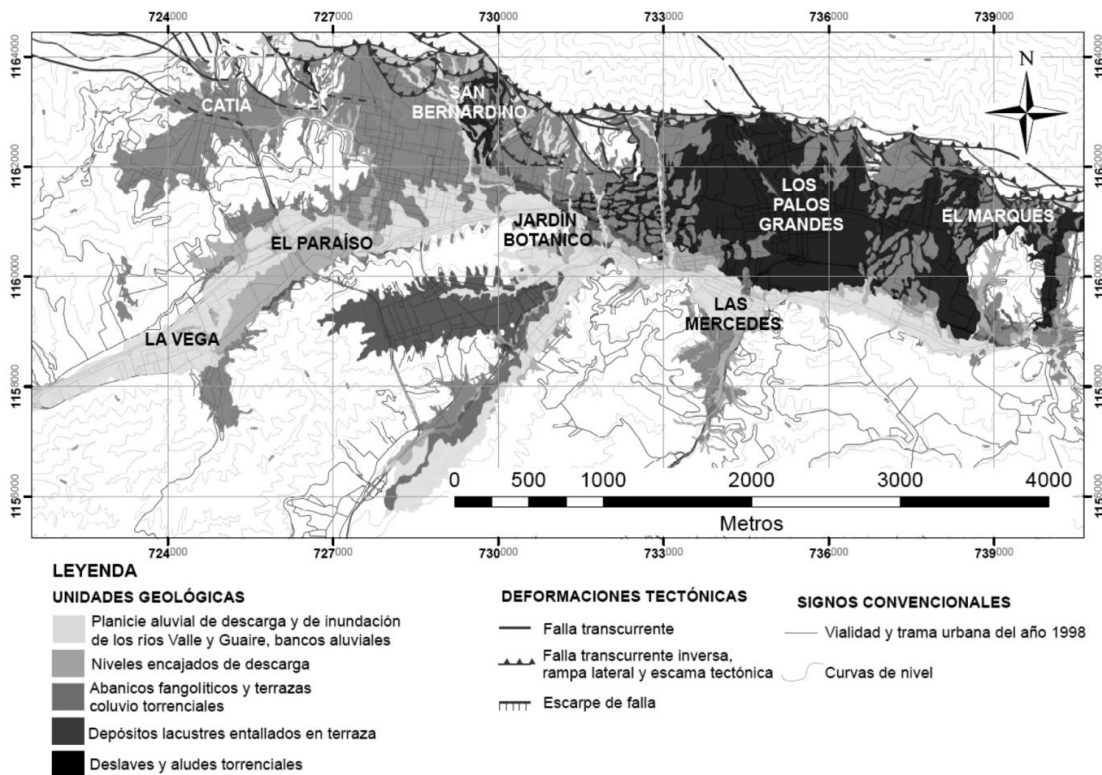


Figura 2. Unidades geológicas cuaternarias simplificadas del valle de Caracas (Singer *et al.* 2007).

La evaluación de los espesores de los sedimentos se basó en la información proveniente de perforaciones de exploración de acuíferos disponibles (Delaware, 1950; Kantak *et al.* 2005), la integración con información proveniente de perfiles sísmicos de refracción hasta el basamento (Murphy *et al.* 1969; Sánchez *et al.* 2005), estimados de profundidad basado en los períodos predominantes de vibración mediante el análisis H/V, provenientes de mediciones de ruido ambiental en más de 1500 puntos (Schmitz *et al.* 2002; Rocabado *et al.* 2006; figura 3) y modelado gravimétrico en 3D (Amaris *et al.* 2009; figura 4).

Los períodos de vibración del suelo superiores a 1 s coinciden con espesores de sedimentos superiores a 100-150 m (Rocabado *et al.* 2009). Los períodos predominantes se usaron también para la calibración de la respuesta dinámica.

Los espesores de sedimentos se calibraron con información proveniente de perforaciones profundas (3 en el este del valle y una en el oeste) que alcanzaron profundidades entre 110 y 280 m. Los nuevos datos sobre los espesores de sedimentos detectados por las perforaciones en Los Chorros y San Bernardino, permitieron corregir las profundidades esperadas en el orden de 100-120 m a valores mayores que 200 m en ambos casos. En dos de estas perforaciones (La Carlota y San Bernardino), se levantó el perfil geotécnico hasta roca, como insumo del perfil detallado del suelo para los análisis dinámicos. En tres sitios se instalaron observatorios acelerográficos con sensores en roca, a 30 m de profundidad y en superficie. Mediante estos observatorios se obtienen registros reales en basamento y superficie para la calibración de los análisis dinámicos y los espectros definidos en las microzonas.

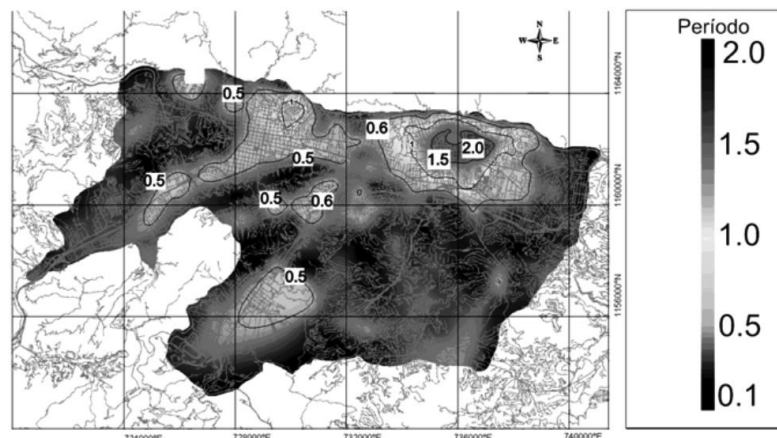


Figura 3. Períodos predominantes en Caracas. (Rocabado *et al.* 2006).

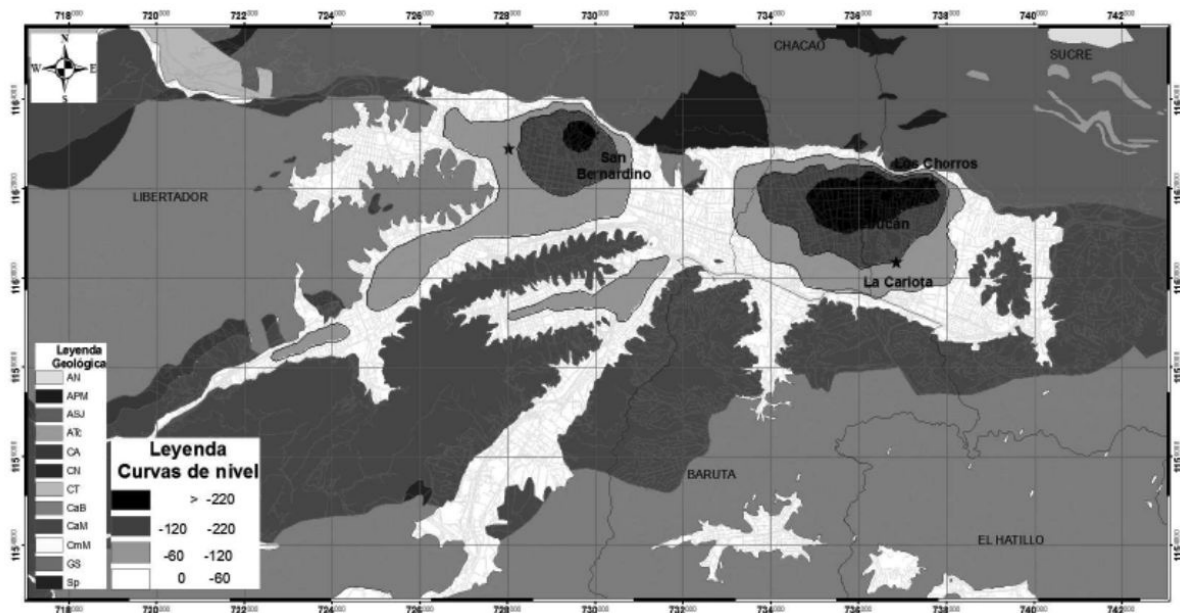


Figura 4. Espesores de sedimentos en el valle de Caracas (Amaris *et al.* 2009) y geología en el Área Metropolitana de Caracas (Urbani & Rodríguez, 2004).

Uno de los parámetros críticos en la caracterización del subsuelo es la velocidad de las ondas de corte, identificada en la norma COVENIN (2001) como uno de los parámetros fundamentales. Por sus características prácticas, se empleó la velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 30 m, ampliamente referida mundialmente (Choi & Stewart, 2005; BSSC, 2003; CEN, 2003), como parámetro del estudio 1D de este proyecto. Aunque el empleo de Vs30 en los análisis de sitio ignora la influencia de estratificaciones particulares, los resultados promedios pueden considerarse representativos de la media general, tras haberse efectuado análisis separados con propiedades no-lineales extremas de suelos granulares y finos, y haberse calibrado las formas espectrales con sismos reales (PEER, 2005). Además, se compararon con algunos análisis de sitios reales estratificados donde se conoce el perfil litológico hasta diferentes profundidades (en 3 casos en el este del valle hasta roca), obteniéndose resultados del mismo orden en general, con algunos casos de valores mayores, en las microzonas de poco espesor sedimentario (GP-02 y GP-03), que se juzgaron que no debían dominar las recomendaciones generales, siguiendo el mismo espíritu de la norma sísmica COVENIN (2001).

Lo fundamental es que con la discriminación en 12 clases de sitios se obtuvieron desviaciones menores entre los espectros reales posibles y los recomendados, respecto a las derivadas de la mayor simplificación en 3 clases de la citada norma, conduciendo a diseños más confiables, con menores excesos y déficits (Hernández *et al.* 2009b). Los mapas de

velocidades sísmicas de los primeros 30 m (Vs30) se basan en los valores de números de golpes SPT obtenidos del análisis de perforaciones geotécnicas (Feliziani *et al.* 2004), las cuales se convierten en velocidades de ondas de corte mediante fórmulas de conversión empíricas para zonas de sedimentos (Imai & Yoshimura, 1970; Ohta & Goto, 1978; Campos *et al.* 2004). Dichos valores se comparan e integran con velocidades sísmicas obtenidas por observaciones directas, tal como mediciones sísmicas de refracción, análisis de ondas superficiales (SASW – Spectral Analysis of Surface Waves), arreglos de microtemores o mediciones de pozo (García *et al.* 2006; Morales *et al.* 2008) para el mapa de Vs30 dentro del valle sedimentario. En las zonas del AMC fuera del valle, se aplicó una metodología de análisis de la topografía (Wald & Allen, 2007; Allen & Wald, 2009), utilizando el mapa de pendientes del AMC (SRTM) para el cálculo de Vs30 (Morales *et al.* 2009a; figura 5).

Espectros de respuesta

Para poder identificar las microzonas mediante los espectros de respuesta para periodo medio de retorno (T) de 475 años (10% de excedencia en 50 años), se elaboraron modelos genéricos de respuesta dinámica, en los cuales se exploraron las variaciones de los espectros de respuesta en función de los valores de la velocidad de propagación de las ondas de corte (Vs30) (propiedades variables entre 150 y 650 m/s) y los espesores de sedimentos (9 clases en el rango entre 30 y 350 m de espesor) (Hernández *et al.* 2009a).

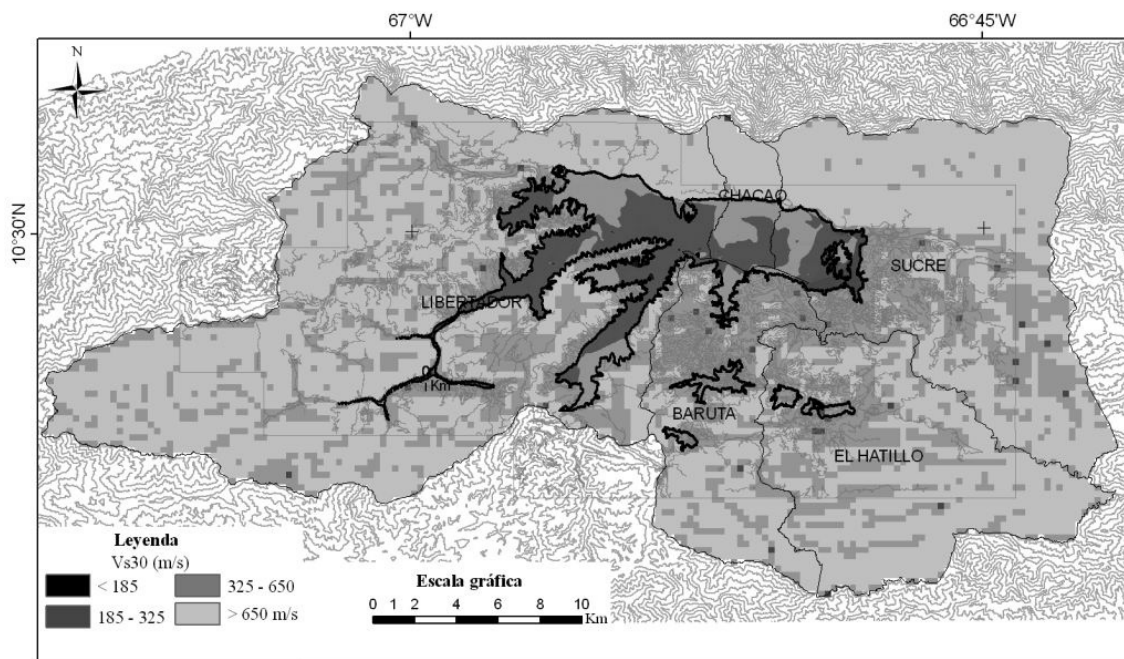


Figura 5. Mapa de Vs30 en el AMC (Morales *et al.* 2009a).

A cada capa de suelo se le asignan curvas de comportamiento no-lineal (cubriendo casos extremos de materiales gruesos y finos) y se efectúa un análisis dinámico lineal equivalente (Schnabel *et al.* 1972), de respuesta de sitios 1D, con excitación sísmica en el basamento rocoso dada por seis acelerogramas deconvolucionados a partir de aquellos en afloramiento rocoso asociados con el espectro del estudio de amenaza sísmica para $T = 475$ años. Se obtuvieron espectros de respuesta probables para 103 perfiles de suelos, como promedio de los espectros de los acelerogramas en superficie obtenidos en los análisis dinámicos, los cuales se agruparon en 12 clases de sitios (Hernández *et al.* 2009b; tabla 1) con espectros 1D ponderados para cada una (Figura 6).

Para los espectros, posteriormente se toman en cuenta los efectos 2D y 3D de la cuenca, que han sido un factor determinante en la distribución de los daños del terremoto de Caracas de 1967. Utilizando los espectros obtenidos por Papageorgiou & Kim (1991) para la zona de Los Palos

Grandes, y rehaciendo los análisis 1D con los parámetros geotécnicos/geofísicos utilizados por ellos, se obtuvieron amplificaciones 2D respecto a 1D hasta un período de 2 s, para cada microzona de distinto espesor de sedimentos, más consideraciones de la calidad del suelo superficial según Bard & Bouchon (1985), ampliando este rango hasta 4 s mediante un estudio 3D de la respuesta de pulsos cuasi-mono-frecuenciales en suelos homogéneos y roca sin atenuación (Delavaud, 2007). Las amplificaciones obtenidas se aplican a los previos espectros 1D, lo que resulta en espectros con efecto de cuenca 2D y 3D (Figura 7; Hernández *et al.* 2009c; 2009d).

Los espectros resultantes se calibraron con los períodos predominantes de vibración resultante de la aplicación del método H/V (Figura 3). Igualmente, se corroborará en el futuro su validez mediante la comparación con los resultados de las evaluaciones de funciones de transferencia experimental (red sísmológica temporal y observatorios acelerográficos). Los espectros de respuesta resultantes para cada grupo se comparan con los espectros normativos correspondientes de la norma vigente COVENIN (2001), NEHRP (BSSC, 2003), el EUROCODIGO 8 (CEN, 2003) y los obtenidos en la microzonificación de la ciudad de Salónica, Grecia, (Pitilakis, 2004).

Se ha obtenido una buena cercanía con los modernos espectros de este último documento que representa el estado del arte actual, apuntando a la adecuación de la metodología empleada en superación de los espectros normativos. Los espectros de respuesta superan los de la norma (COVENIN, 2001) sobre todo para suelos rígidos e intermedios en un rango de períodos de aproximadamente 0,5 a 2 s (Figura 7). Sin embargo, los espectros en afloramiento rocoso sano en sitios cuasi-planos son menos exigentes que el normativo, permitiendo alguna economía en ellos.

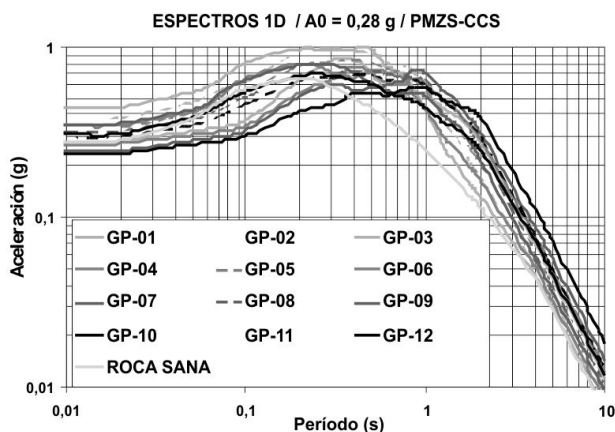


Figura 6. Conjunto de espectros 1D para las clases de sitios para una aceleración pico en roca de 0,28 g, correspondiente a la macrozona Centro Norte que cubre la mayor parte del valle sedimentario de Caracas (Hernández *et al.* 2009b).

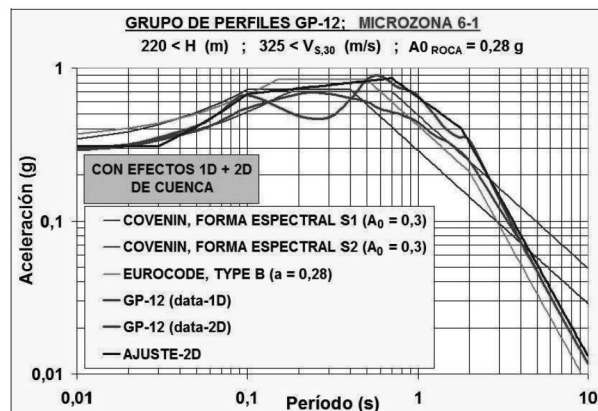
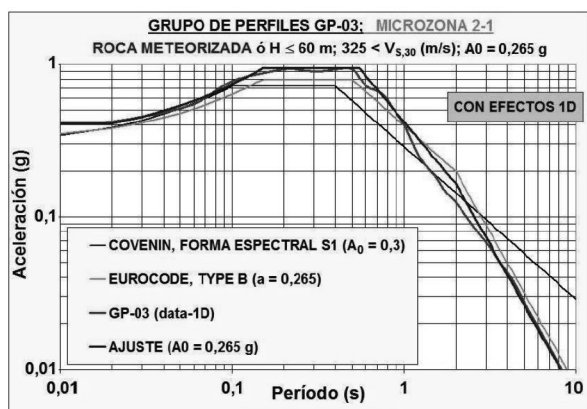


Figura 7. Espectros de diseño para las microzonas, ejemplo para roca meteorizada (izquierda) y espesor sedimentario superior a 220 m (derecha); ambos ejemplos para $V_{s30} > 325$ m/s (Hernández *et al.* 2009c; 2011).

Una mejora importante, adicional a la de los sitios de sedimentos profundos, es que para suelos rígidos de depósitos someros y para los sitios de roca meteorizada, los espectros obtenidos son más severos que los de sitios de roca sana, tal como se ha observado en sismos reales (terremoto de Atenas en 1999: Bouckovalas & Kouretzis, 2001) en lugar de los mismos espectros (perfil S1) de la norma sísmica para ambos casos.

Se introdujeron además estimaciones para establecer los efectos topográficos, para lo cual se toman como guía las recomendaciones de la AFPS (1990) para la definición de situaciones, introduciendo algunas simplificaciones razonables, las cuales inciden en las amplificaciones de periodos cortos (Hernández *et al.* 2009c). El conjunto de espectros para todas las macrozonas y microzonas, tanto para roca como para suelo, se suavizan para diseño con 5 ramas por rangos de periodos característicos Hernández & Schmitz, 2009b).

Delimitación de las microzonas

La amenaza sísmica en el área de Caracas corresponde a una aceleración pico en roca de 0,3 g, para un período de retorno de 475 años según la Norma de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN, 2001). En este estudio, se detalló la amenaza para el AMC mediante un estudio probabilístico, utilizando un modelo sismogénico revisado y leyes de atenuación mundiales válidas en nuestro ambiente tectónico (Azuaje & Hernández, 2005; Hernández, 2007; 2009), con las cuales se obtuvieron espectros de amenaza uniforme, en lugar de sólo aceleración pico como en la norma sísmica. Los espectros se caracterizaron mediante la aceleración pico en roca (A0), variable entre 0,265 g y 0,30 g en el AMC, y la respuesta espectral a periodo de 1 s (A1) probables, variable entre 0,28 g y 0,21 g en el AMC, ambas para periodo medio de retorno (T) de 475 años. Las diferentes

tendencias de variación de A0 y A1 indican que la relación fija entre ambas, presente en la norma sísmica, es una simplificación y se toma en cuenta su contraste para el proyecto de microzonificación sísmica de Caracas. Otro resultado de interés fue la variación con el periodo de respuesta del factor de importancia para edificaciones esenciales, en lugar del factor fijo normativo α , a partir de las relaciones entre los espectros del estudio de amenaza sísmica para T = 975 años (5% de excedencia en 50 años) y T = 475 años. Se eligieron 4 macrozonas básicas: N (norte), CN (centro-norte), CS (centro-sur) y S (sur), para las que se refieren valores de {A0; A1}, y se definen espectros básicos en afloramiento rocoso (Hernández & Schmitz, 2009a; Figura 8).

Para la definición de los bordes de cada microzona de comportamiento sísmico similar dentro del valle sedimentario que toman en consideración la modificación debido a los estratos sedimentarios y/o meteorizados, se utilizó el conjunto de unidades geológicas cuaternarias del valle de Caracas (Singer *et al.* 2007; figura 2), el espesor de sedimentos en 4 grupos (Figura 4), la distribución de los valores Vs30 (Figura 5) la localización de los daños del terremoto de 1967 en casos específicos como San José y Montalbán (Figura 1; Domínguez *et al.* 2009) y la distribución de efectos 3D de la cuenca (Delavaud, 2007; figura 9) para una fuente en el norte según los escenarios discutidos en Rocabado *et al.* (2006). En la figura 10 se muestra el mapa final de microzonas con similar respuesta sísmica obtenido para el AMC (Morales *et al.* 2009b). A cada microzona delimitada bajo los criterios arriba indicados, se le asigna un espectro de diseño según su clase de sitio (Tabla 1; figura 7). Esta distribución de microzonas se calibró a través de diferentes variables, tales como perfiles de suelos “reales” de pozos profundos, periodos predominantes de H/V y funciones de transferencia experimental. Para la zona de cerros y laderas, se toman en consideración el grado de meteorización de la roca, para poder asignar espectros de diseño

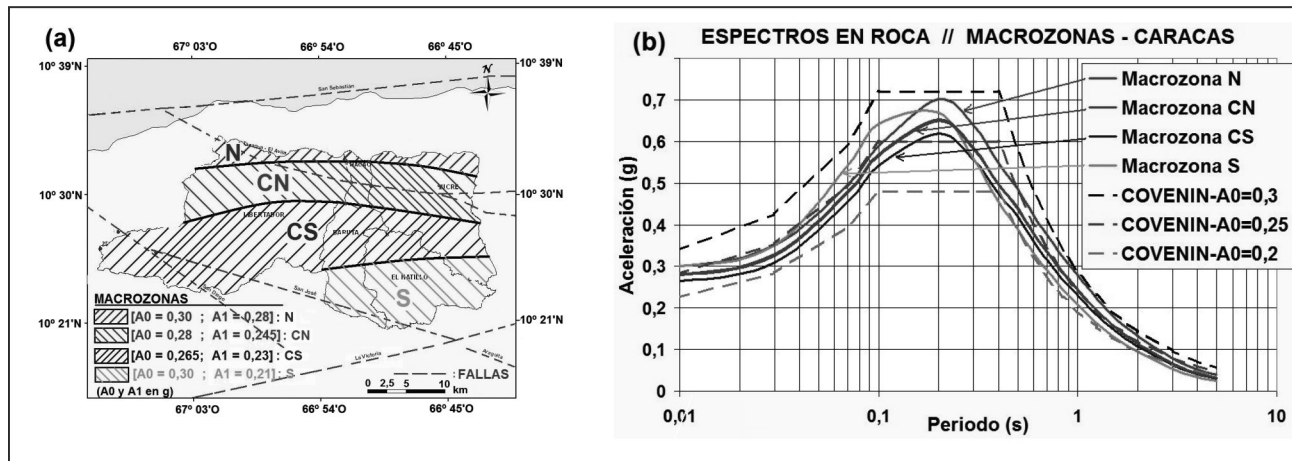


Figura 8. (a) Macrozonas elegidas en el AMC; (b) Espectros en roca de macrozonas vs. normativos-S1 en tres zonas diferentes del país (Hernández & Schmitz, 2009a).

diferentes según sean afloramientos rocosos sanos o roca meteorizada, así como los efectos topográficos (Hernández & Schmitz, 2009b), mediante el citado procedimiento sugerido en AFPS (1990). Se agrega una franja de seguridad en las zonas de influencia directa de las fallas activas carto-

grafiadas en el AMC según Bryant & Hart (2004). Dichas fallas son: Tacagua y El Ávila al norte (menor incertidumbre); Sur Guarenas hacia el este y San Antonio y San José al sur (zonas de mayor incertidumbre).

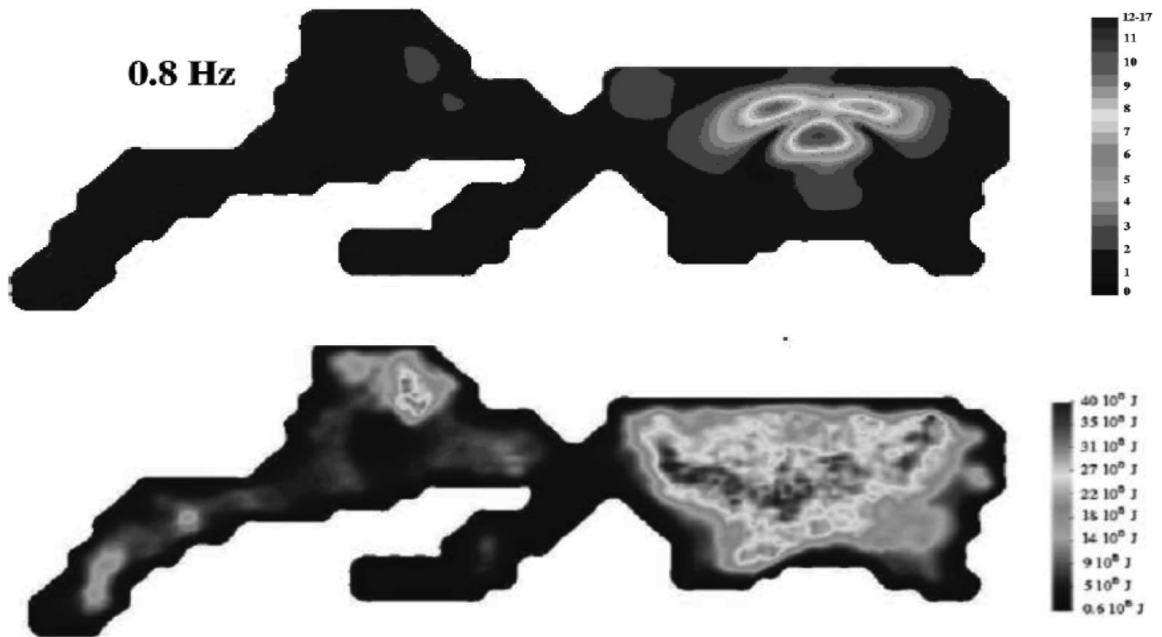


Figura 9. Efectos de la cuenca sedimentaria de Caracas, derivados del modelado 3-D de la respuesta sísmica (Delavaud, 2007). Se muestran resultados para una onda S plana con un ángulo de incidencia de 35° N, polarización E-O, proveniente del norte, relación espectral entre la componente E-O y la onda plana para 0,8 Hz (arriba) y energía cinética para 30s de duración de la señal (abajo).

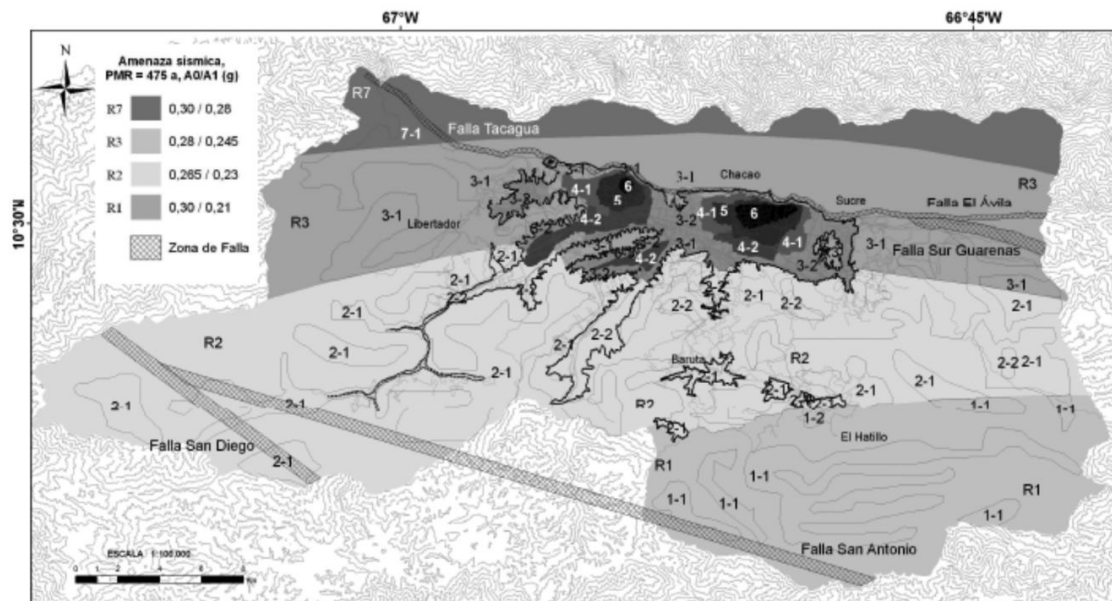


Figura 10. Zonificación de la amenaza sísmica en afloramientos de roca (macrozonas) y microzonas de comportamiento sísmico similar en el valle de Caracas. A cada microzona se le asigna un espectro de respuesta específico (ver figura 7). Para espesores de 0 a 60 m: 1-1, 2-1, 3-1, 7-1 ($VS_{30} > 325 \text{ m/s}$) y 1-2, 2-2, 3-2 ($VS_{30}: 185\text{-}325 \text{ m/s}$) y 3-3 ($VS_{30} \leq 185 \text{ m/s}$); para espesores de 60 a 120 m: 4-1 ($VS_{30} > 325 \text{ m/s}$) y 4-2 ($VS_{30}: 185\text{-}325 \text{ m/s}$); para espesores de 120 a 220 m: 5 ($VS_{30} > 185 \text{ m/s}$); para espesores mayores a 220 m: 6 ($VS_{30} > 185 \text{ m/s}$).

Peligro de deslizamientos por sismos

Fuera de las zonas sedimentarias, se analizó la estabilidad de las laderas a escala 1:25.000 respecto a deslizamientos por sismos para el AMC (Hernández *et al.* 2008; 2009e; figura 11). Se identificaron seis niveles de peligro en los mapas, los cuales podrán ayudar a guiar las decisiones de priorización de estudios especiales e implementación de medidas de mitigación. Como soporte se contó con información geológica geomorfológica y geotécnica previamente desarrollada en el llamado Sector Central a escala 1:10.000 (Feliziani *et al.* 1985), así como con modelos digitalizados de elevación. Se efectuó una caracterización geotécnica de las laderas que toma en cuenta sus características litológicas, estructurales, clinométricas y de geodinámica externa, incluyendo la intervención antrópica, mediante índices cuantitativos cuya ponderación condujo a cinco clases de laderas, a las cuales se les asignaron cohesión y ángulo de fricción, a semejanza de Miles & Keefer (2001). Los valores de estos parámetros fueron calibrados en el subsector de la Urb. Alto Prado mediante mapas de orientación geotécnica con información a escala 1:2500, calculando la susceptibilidad a los deslizamientos y correlacionándola con los deslizamientos previos o latentes causados por lluvias (Valleé *et al.* 2009). Para la evaluación del peligro sísmico se utilizó una moderna metodología mundialmente aceptada que ha sido calibrada experimentalmente ante terremotos (Jibson *et al.* 1998); consiste en una estimación de deformaciones de Newmark (1965) correlacionada con intensidades de Arias; éstas se obtuvieron para el AMC mediante un análisis de amenaza sísmica, asumiendo un período medio de retorno de 700 años, valor normativo equivalente para las edificaciones masivas.

Desempeño estructural

Para la definición de recomendaciones de políticas prioritarias de atención a las edificaciones más riesgosas en función de las microzonas en que están situadas, se realizó una evaluación aproximada de las edificaciones típicas (aportadas de concreto armado) de la ciudad de Caracas que pueda servir de guía para razonar la conveniencia de algunas recomendaciones (Hernández & Domínguez, 2009). Para diez prácticas constructivas seleccionadas (empleadas en el curso de siete décadas, como combinación de normas sísmicas y de diseño en concreto armado) se estimaron sus espectros inelásticos de diseño equivalentes a partir de las relaciones entre las resistencias de servicio y los límites y asignando factores de reducción de respuesta asociados con el detallado constructivo. Se compararon con los respectivos espectros demandados en ocho microzonas de la cuenca sedimentaria del valle de Caracas, cubriendo edificaciones de 1 a 20 pisos, y se efectuaron evaluaciones aproximadas de demandas estructurales para tres prácticas constructivas, como referencias de vulnerabilidad. Se obtuvieron curvas de fragilidad de distintos grados de daño, índices de confiabilidad estructural y estimados de pérdidas para cada práctica constructiva, dos rangos de espesores de depósitos y dos rangos de alturas de edificaciones. Estos resultados fueron calibrados contra los daños del terremoto de Caracas de 1967 y una escala macrosísmica mundial, para validación de su aplicabilidad.

Permitieron emitir recomendaciones básicas, separadas entre edificios bajos y altos para las diversas prácticas constructivas y según espesores de depósitos profundos (> 120 m) o someros, como una primera aproximación. En la tabla

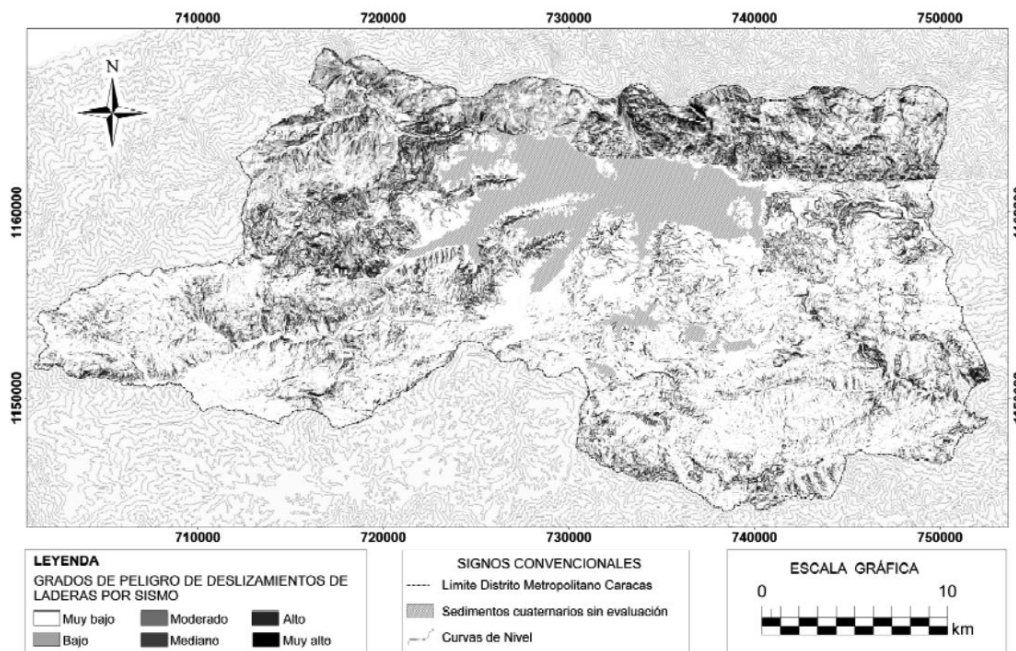


Figura 11. Mapa de peligro de deslizamientos en laderas por sismo, según Hernández *et al.* (2009e).

2 se resumen recomendaciones de intervención, en el marco de políticas públicas de mitigación, para edificaciones regulares de acuerdo con la siguiente calificación de prioridades: P (prioritaria); O (obligatoria); C (Conveniente); e I (innecesaria), mientras que las irregularidades operan como agravantes de las prioridades. La palabra intervención alude a la evaluación de la edificación y su eventual refuerzo (u otro tipo de adecuación) posterior; las decisiones finales deben ser fruto de un estudio detallado y asumidas por calificados profesionales.

Tabla 2. Recomendaciones de prioridades de intervención de edificios regulares aporricados de concreto armado 1, 2, 3 (Hernández & Domínguez, 2009).

UBICACIÓN; Altura de edificios	N O R M A S E M P L E A D A S									
	1939 - 1947	1948 - 1955	1955 - 1967	1955 - 1967	1967 - 1982	1971 - 1982	1982 - 1985	1985 - 1998	1998 - 2001	2001 -
	MOP-1939	MOP-1947	MOP-1955-offc.	MOP-1955-no-offc.	MOP-1967 + MOP-CA-TC-67	MOP-1967 + ACT-318-71	COVENIN 1756-82 + ATC-3-06	COVENIN 1756-82 + COVENIN 1753-85	COVENIN 1756-98 + COVENIN 1753-85	COVENIN 1756-2001 + COVENIN 1753-85
H > 120 m; Edif. altos	O	P	P	P	C	C	C	I	I	C
H > 120 m; Edif. bajos	O	O	O	O	C	C	C	I	I	I
H ≤ 120 m; Edif. altos	O	P	P	P	C	I	I	I	I	I
H ≤ 120 m; Edif. bajos	O	O	O	O	C	C	C	I	I	I

¹ H = espesor del depósito de suelos hasta el basamento rocoso

² Intervención recomendada = P: prioritaria; O: obligatoria; C: conveniente; I: innecesaria

³ Las edificaciones irregulares deben calificar en el grupo de intervención inmediatamente más exigente que el de las regulares del mismo tipo.

CONCLUSIONES

La distribución de daños causados por el terremoto de Caracas de 1967, evidenció fuertes efectos de sitio dentro del valle sedimentario. Sin embargo, los parámetros principales que controlan la respuesta sísmica, como el espesor de sedimentos hasta el basamento rocoso y la geometría de la cuenca, no están considerados en la norma venezolana de edificaciones sismorresistentes y ameritaron el desarrollo de un proyecto de microzonificación sísmica. Durante su ejecución se empleó una metodología multidisciplinaria para la evaluación de la respuesta sísmica en diferentes zonas de Caracas, la cual se basa en la aplicación de espectros en superficie calculados con base en modelos genéricos del subsuelo, variando la velocidad de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m (Vs30) y los espesores de sedimentos para una configuración fija de características de los sedimentos. Los espectros resultantes se calibraron con diferentes metodologías (perfiles reales del suelo, medicio-

nes de ruido ambiental, resultados de estudios y normas internacionales, entre otros) y se agregaron, en las zonas con sedimentos cuaternarios, los efectos de cuenca.

Los resultados del proyecto presentados en este artículo permiten asignar espectros de respuesta modificados para las diferentes partes de Caracas con las recomendaciones correspondientes para su utilización, en complemento de las indicaciones de la norma venezolana. Estos resultados pueden implementarse de una vez por las municipalidades, porque la norma sísmica permite que estudios especiales autorizados, como los correspondientes al Proyecto de Microzonificación, sustituyan parcialmente a sus especificaciones. Se establecieron además recomendaciones para la priorización de intervenciones en edificaciones existentes según los espesores de las microzonas donde están ubicadas como una primera aproximación, las cuales igualmente son compatibles con el espíritu de la norma sísmica.

Se incluyó en el proyecto una evaluación de deslizamientos por terremotos. Con base en los análisis de estabilidad, se establecieron la susceptibilidad de deslizamientos y el peligro de deslizamiento activados por movimientos sísmicos, considerando las intensidades de Arias en la región. Los mapas podrán usarse en la definición de zonas prioritarias para la intervención de zonas de mayor peligrosidad. A partir de los resultados obtenidos no deberán tomarse decisiones inmediatas de intervenciones locales; el objetivo ha sido la identificación de las zonas más peligrosas a deslizamientos y en ellas convendrá que principalmente se realicen estudios y proyectos detallados de carácter multidisciplinario en conjunción de las ingenierías geológica, geotécnica y sísmica.

AGRADECIMIENTOS

Los demás miembros del Grupo de trabajo del Proyecto Microzonificación Sísmica de Caracas son: A. Aguilar, I. Aguilar, L. Alvarado, F. Anzola, J. Araque, F. Audemard, J. Azuaje, P.Y. Bard, H. Cadet, V. Cano, E. Caraballo, A. Castillo, L. Colmenárez, C. Cornou, P. Feliziani, Y. Flores, K. García, J. González, J. Guzmán, A. Hernández, A. Justiniano, R. López, W. Marín, J. Moncada, R. Ollarves, J. Oropeza, M. Palma, B. Quintero, H. Rendón, J. Rodríguez, L. Rodríguez, G. Romero, J. Sánchez, F. Urbani, R. Vásquez, M. Villar, J.-P. Vilotte, A. Zambrano, H. Zambrano, J. Zamora. El financiamiento fue proporcionado por el “Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto” (FONACIT-BID II 2004000738). La realización del proyecto fue posible gracias al incentivo de N. Orihuela y G. Malavé. Este trabajo constituye un aporte al proyecto FONACIT-ECOS Nord 2004000347 “Estructura de velocidades de ondas S, patrón de atenuación y

respuesta sísmica 3-D en el valle de Caracas y un estudio comparativo con Cumaná, Venezuela”. Se agradecen a A. Papageorgiou las fructíferas discusiones que contribuyeron positivamente a este trabajo, así como a O. Ramírez y un árbitro anónimo sus observaciones.

REFERENCIAS

- ABEKI, N., SEO, K., MATSUDA, I., ENOMOTO, T., WATANABE, D., SCHMITZ, M., RENDÓN, H., SÁNCHEZ, A. (1998). *Microtremor observations in Caracas city, Venezuela*. In: Irikura *et al.* (ed.). *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Rotterdam, AA Balkema, p. 619-624.
- AFPS. (1990). *Recommendations of the French Association for Earthquake Engineering for the redaction of rules relative to structures and installations built in regions prone to earthquakes*. Association Française du Génie Parasismique, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France.
- ALLEN, T. & WALD, D. (2009). *On the use of high-resolution topographic data as proxy for seismic site conditions (Vs30)*. Bull. Seism. Soc. Am., 99(2A), 935-943.
- AMARIS, E., SÁNCHEZ, J., ROCA BADO, V., MONCADA, J., SCHMITZ, M., GONZÁLEZ, M. (2009). *Espesores y características de los sedimentos profundos*. Sub-capítulo 3.4, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 354-384.
- ARCIA, J., BRICEÑO, E., SCHMIDT, L. (1978). *Evaluación e interpretación de daños*. Capítulo X en Segunda fase del estudio del sismo ocurrido en Caracas el 29 de julio de 1967, Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, Ministerio de Obras Públicas. FUNVISIS (editor). Caracas.
- AUDEMARD, F.A., M. MACHETTE, M., COX, J., DART, R., HALLER, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. US Geological Survey Open-File Report 00-0018. Include map at scale 1:2,000,000 and 78-page report.
- AZUAJE, J. & HERNÁNDEZ, J. (2005). *Análisis de amenaza sísmica para Caracas, incluyendo efectos de sitio*. IV Coloquio de Microzonificación Sísmica, Barquisimeto. Memorias en Serie Técnica N° 1-2005, FUNVISIS, Caracas, p. 31-35.
- BELTRÁN, C. (1994). *Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000*. VII Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, p. 541-547.
- BARD, P. Y. (1999). *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?* In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatani, T. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study*, vol. 3, Balkema, Rotterdam, p. 1251-1279.
- BARD, P. Y. & BOUCHON, M. (1985). *The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys*. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 519-541.
- BOUCKOVALAS, G.D. & KOURETZIS, G.P. (2001). *Stiff soil amplification effects in the September 1999 Athens (Greece) earthquake*. Soil Dynamics and Earthquake Eng., 21, 671-687.
- BRICEÑO, F., SANABRIA, J., AZPÚRUA, P., PLANCHART, M., CASTELLANOS, S., OLIVARES, A., LUSTGARTEN, P., KELEMEN, J., GARCÍA, J., GONZÁLEZ DE J., C., CARRILLO, P., PÉREZ, H., SEED, H., WHITMAN, R., MURPHY, V., LINEHAN, D., TURCOTTE, T., STEINBRUGGE, K., ESPINOSA, A. ALGERMISSEN, S., ARCIA, J., PUIG, J., SCHMIDT, L., GONZÁLEZ, J.V., MARTÍNEZ, J., KNUDSON, C., CRAN, C., PRESHEL, M., HOLOMA, S., GÓMEZ, J., J. LUCHSINGER, J., SILVA, M., FORTOUL, C., LAMAR, S., GRASES, J., VIGNIERI, L., VALLADARES, E., SUÁREZ, J., GÓMEZ, G., AZPÚRUA, J., PAPANONI, M., RAMOS, C., ROMERO, A., DELGADO, J., AZOPARDO, P., GRINSTEINS, V., ISAACURA, J., CASTELLANOS, H., VARGAS, J. (1978). *Segunda fase del estudio del sismo ocurrido en Caracas el 29 de julio de 1967*. Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, Ministerio de Obras Públicas, 2 volúmenes, 1281 pp. (FUNVISIS, editor, Caracas).
- BRYANT, W. Y. & HART, E. (2004). *Fault-Rupture hazard zones in California. Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act with index to earthquake fault zones maps. California Department of Conservation. California Geological Survey. Special Publication 42, 46 pp.*
- BSSC. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450)*. Building Seismic Safety Council (BSSC), NIBS, Washington.
- CAMPOS, A., SCHMITZ, M., CATALDI, A. (2004). *Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos y geotécnicos en pozos disponibles a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas*. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, CD, 12 pp.
- CEN, (2003). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. European Standard, English ver-

- sion, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels.
- CHOI, Y. & STEWART, J. P. (2005). *Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity*. Earthquake Spectra, 21(1), 1–30.
- COVENIN, (2001). *Edificaciones sismorresistentes*, COVENIN 1756:2001. Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas.
- DELAUVAUD, É. (2007). *Simulation numérique de la propagation d'ondes en milieux géologiques complexes: application à l'évaluation de la réponse sismique du bassin de Caracas*. PhD thesis, IGP, France, 155 pp.
- DELAWARE (Seismographic Service Corporation of Delaware/ Tulsa, EEUU). (1950). *Informe sobre investigaciones de aguas subterráneas del valle de Caracas*. Unpublished, Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS), (Ministerio de Obras Públicas), 189 p.
- DOMÍNGUEZ, J., COLMENÁREZ, L., HERNÁNDEZ, J.J., LEAL, V., CANO, V. (2009). *Daños estructurales en el terremoto de 1967*. Sub-capítulo 5.1, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 649-689.
- FELIZIANI, P., DE LUCA, P., BARRIENTOS, C., BASTARDO, S., RAMÍREZ, R. (1985). *Estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas (Sector Central)*. VI Congreso Geológico Venezolano.
- FELIZIANI, P., PISCITELLI, G., CASTILLO, A. (2004). *Sistema de Información Geográfica aplicado al subsuelo del Área Metropolitana de Caracas – Proyecto SIGAMC*. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, Memorias.
- GARCÍA, K., MORALES, C., SÁNCHEZ, J., SCHMITZ, M. (2006). *Determinación de velocidades de ondas de corte (V_s30) en el área metropolitana de Caracas, a partir de conversión SPT-velocidad de ondas de cortes, análisis de ondas superficiales y sísmicas de refracción*. VIII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Valencia, Memorias en CD, 9 pp.
- GRASES, J., (1990). *Terremotos destructores del Caribe 1502-1990*. 1ra ed., Orcyt-Unesco, Montevideo, Uruguay, 132 pp.
- HERNÁNDEZ, J. J. (2007). *EASP v.1b. Evaluación de la Amenaza Sísmica Probable*. Programa de computación en Plataforma Scilab (c) INRIA-ENPC.
- HERNÁNDEZ, J. J. (2009). *Revisión de la sismicidad y modelo sismogénico para actualización de las evaluaciones de amenaza sísmica en la región norcentral de Venezuela*. IX Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas, Memorias en CD, 15 pp.
- HERNÁNDEZ, J. J. & DOMÍNGUEZ, J. (2009). *Evaluación aproximada de edificaciones típicas*. Sub-capítulo 5.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 701-816.
- HERNÁNDEZ, J. J. & SCHMITZ, M. (2009a). *Evaluación actualizada de amenaza sísmica para la microzonificación de Caracas*. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, Memorias en CD, 4 pp.
- HERNÁNDEZ, J. J. & SCHMITZ, M. (2009b). *Espectros de diseño para microzonas*. Sub-capítulo 6.4, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 876-924.
- HERNÁNDEZ, J. J., SCHMITZ, M., AUDEMARD, F., MALAVÉ, G. (2006). *Marco conceptual del proyecto de microzonificación de Caracas y Barquisimeto*. VIII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Valencia, Memorias en CD, 8pp.
- HERNÁNDEZ, J. J., VALLEÉ, M., FELIZIANI, P., SCHMITZ, M., OROPEZA, J., TAGLIAFERRO, M., CASTILLO, A., CANO, V. (2008). *Peligro sísmico de deslizamientos en laderas de Caracas*. Conferencia 50 Aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, Memorias en CD, 14 pp.
- HERNÁNDEZ, J. J., DOMÍNGUEZ, J., HERNÁNDEZ, A. (2009a). *Estudio paramétrico de respuestas 1D de sitio*. Sub-capítulo 4.1, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 388-411.
- HERNÁNDEZ, J. J., SCHMITZ, M., DOMÍNGUEZ, J., GONZÁLEZ, M. (2009b). *Espectros 1D por clases de sitio*. Sub-capítulo 4.2, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 412-502.

- HERNÁNDEZ, J. J., SCHMITZ, M., DELAUAUD, E., ALVARADO, L., ROCABADO, V., VILOTTE, J. P., RENDÓN, H. (2009c). *Efectos 2D y 3D de cuenca*. Sub-capítulo 4.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 503-539.
- HERNÁNDEZ, J. J., SCHMITZ, M., DELAUAUD, E., CADET, H., DOMÍNGUEZ, J. (2009d). *Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas considerando efectos de sitio 1D, 2D y 3D*. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, Memorias en CD, 4 pp.
- HERNÁNDEZ, J. J., M. VALLEÉ, M., SCHMITZ, M., TAGLIAFERRO, M., OROPEZA J., CANO, V. (2009e). *Peligro sísmico de deslizamiento en laderas*. Sub-capítulo 4.5, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 601-648.
- IMAL, T. & YOSHIMURA, M. (1970). *Elastic Wave Velocity and Dynamics Characteristics of the Soft Ground*. Soils and Foundation, 18(1), 17-22.
- INE, (2002). *Así va el Censo 2001. Población y Vivienda*, Instituto Nacional de Estadística.
- JIBSON, R., HARP, E., MICHAEL, J. (1998). *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area*. Open-File Report 98-113. U.S. Geological Survey.
- KANTAK, P., SCHMITZ, M., & AUDEMARD, F. (2005). *Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas Valley*. Rev. Fac. Ing. UCV, Caracas, 20(4), 43-56.
- MARTÍNEZ, R. (2006). *Consideraciones preliminares respecto a incluir los estudios de microzonificación sísmica en la planificación y control urbano en Venezuela*. Boletín Técnico IMME, 44(1), 1-15.
- MILES, S. & KEEFER, D. (2001). *Seismic landslide hazard for the cities of Oakland and Piedmont, California*. Miscellaneous Field Studies Map MF-2379, U.S. Geological Survey, Denver.
- MORALES, C., MASY, J., SCHMITZ, M., CATALDI, A., ROJAS, H., ÁVILA, J., ROJAS, S., GONZÁLEZ, M. (2008). *Aplicación de Métodos Geofísicos para la Caracterización de sitios en el estudio de Microzonificación Sísmica de Caracas*. Conferencia 50 Aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, Memorias en CD, 15 pp.
- MORALES, C., GARCÍA, K., GONZÁLEZ, M., TAGLIAFERRO, M., FLORES, Y., VILLAR, M., JUSTINIANO, A., MONCADA, J., SCHMITZ, M., HERNÁNDEZ, J. J., CANO, V., (2009a). *Características geofísicas y geotécnicas someras (Vs30)*. Sub-capítulo 3.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 333-353.
- MORALES, C., SCHMITZ, M., HERNÁNDEZ, J. J., ROCABADO, V., VALLEÉ, M., TAGLIAFERRO, M., OROPEZA, J., CANO, V. (2009b). *Selección de microzonas en sedimentos y laderas*. Sub-capítulo 6.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 861-875.
- MURPHY, V., LINEHAN, D., TURCOTTE, T. (1969). *Seismic Investigations, Valley of Caracas and the Litoral Central*. Weston Geophysical Engineers International, Inc., Weston, Massachusetts (bajo la planificación y supervisión de la Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo), 22 pp.
- NEWMARK, N. (1965). *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Fifth Rankine Lecture, Géotechnique, 15(2), 139-160.
- OHTA, Y. & GOTO, N. (1978). *Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6, 167-187.
- PAPAGEORGIOU, A. S. & KIM, K. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2214-2233.
- PEER, (2005). *PEER NGA Database*. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California.
- PITILAKIS, K. (2004). *Site effects*. Chapter 5, in: Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- ROCABADO, V., SCHMITZ, M., RENDÓN, H., VILOTTE, J.-P., AUDEMARD, F., SOBIESIAK, M., AMPUERO, J.-P., ALVARADO, L. (2006). *Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del valle de Caracas*. Rev. Fac. Ing. UCV, Caracas), 21(4), 81-93.
- ROCABADO, V., SCHMITZ, M., HERNÁNDEZ, J. J., MORALES, C. (2009). *Relación entre periodo del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas*. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica. Caracas, Venezuela. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, Memorias en CD, 4 pp.
- SÁNCHEZ, J., SCHMITZ, M., CANO, V. (2005). *Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas*. Boletín Técnico IMME, 43(2), 49-67.
- SCHMITZ, M. (2002). *Las aplicaciones de la microzonificación sísmica y las responsabilidades y participación de los entes oficiales y privados en su realización y aplicación*. III Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas. Serie Técnica No. 1-2002, FUNVISIS.
- SCHMITZ, M., ENOMOTO, T., AMPUERO, J.-P., ROCABADO, V., KANTAK, P., SÁNCHEZ, J., RENDÓN, H., GONZÁLEZ, J., ABEKI, N., VILOTTE, J.-P., NAVARRO, M., DELGADO, J. (2002). *Seismic microzonation study in Chacao district, Caracas, Venezuela*. 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, extended abstract, paper Nr. 808, 10 pp.
- SCHNABEL, P., LYSMER, J., SEED, H. (1972). *SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley.
- SEED, H. B., IDRIS, I.M., DEZFULIAN, H. (1970). *Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas earthquake of July 29, 1967*. EERC-Report 70-2, Berkeley, California, 40 pp.
- SEMBLAT, J. F., DUVAL, A.M., DANGLA, P. (2002). *Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method*. Computers and Geotechnics, 29, 573-585.
- SINGER, A. (1977). *Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas, Venezuela*. V Congreso Venezolano de Geología, Memorias 4, p. 123-170.
- SINGER, A., ZAMBRANO, A., OROPEZA, J., TAGLIAFERRO, M. (2007). *Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del Valle de Caracas a escala 1:25.000*. IX Congreso Geológico Venezolano, Caracas, Memorias.
- SUÁREZ, G., NÁBĚLEK, J. (1990). *The 1967 Caracas earthquake: Fault geometry, direction of rupture propagation, and seismotectonic implications*. J. Geophys. Res., 95, 17459-17474.
- URBANI, F., RODRÍGUEZ, J. (2004). *Atlas geológico de la cordillera de la costa de Venezuela*. Caracas. Ediciones Fundación GEOS, escalas 1:25000, p. 146.
- VALLEÉ, M., TAGLIAFERRO, M., FELIZIANI, P., CASTILLO, A., ZAMORA, J., ANZOLA, F., HERNÁNDEZ, J. J. (2009). *Caracterización de laderas*. Sub-capítulo 4.4, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, inédito, p. 540-600.
- WALD, D. & ALLEN, T. (2007). *Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification*: Bull. Seism. Soc. Am., 97(5), 1379-1395.
- WHITMAN, R. V. (1969). *Efecto de las condiciones del suelo en el daño producido a las estructuras por el terremoto de Caracas del 29 de Julio de 1967*. Estudio realizado para la Comisión Presidencial.
- YAMAZAKI, Y., AUDEMARD, F., HERNÁNDEZ, J. J., ORIHUELA, N., SAFINA, S., SCHMITZ, M., ALTEZ, R., TANAKA, I., KAGAWA, H., JICA STUDY TEAM EARTHQUAKE DISASTER GROUP. (2004). *Earthquake Scenarios in Caracas for Disaster Prevention*. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, Memorias en CD, 11 pp.
- YAMAZAKI, Y., AUDEMARD, F., ALTEZ, R., HERNÁNDEZ, J. J., ORIHUELA, N., SAFINA, S., SCHMITZ, M., TANAKA, I., KAGAWA, H., JICA STUDY TEAM-EARTHQUAKE DISASTER GROUP. (2005). *Estimation of the seismic intensity in Caracas during the 1812 earthquake using seismic microzonation methodology*. Revista Geográfica Venezolana, Número Especial 2005, 199-216.