

PELIGROSIDAD SÍSMICA LOCAL PARA LA CIUDAD DE MÉRIDA, VENEZUELA. IMPLEMENTACIÓN EN SIG (SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)

Autores: A. Castillo¹, F. López-Almansa² y Ll. G. Pujades i Beneit³

¹ *Universidad de Los Andes, Facultad de Arquitectura, Dpto. de Tecnología de la Construcción, Complejo La Hechicera, Edif. Arquitectura, Mérida 5101, Venezuela. E-mail: argimiro@menta.net*

² *Universidad Politécnica de Cataluña, Dpto. de Estructuras en la Arquitectura, ETSAB – UPC, Avda. Diagonal 649, 08028 Barcelona. E-mail: francesc.lopez@ea.upc.es*

³ *Universidad Politécnica de Cataluña, Dpto. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Campus Nord UPC, Mòdul D2, 08034 Barcelona. E-mail: lluis.pujades@upc.es*

RESUMEN

Se elabora un estudio de Peligrosidad Sísmica Local para la ciudad de Mérida tomando como fuente sismogénica principal la Zona de Falla Boconó (ZFB). El evento máximo esperado tiene una magnitud 7.3 en la escala de Richter, con un período de retorno de 3000 años. Se ha obtenido la respuesta en superficie con Shake91 [Idriss y Sun, 1992], y EERA [Bardet et al., 2000] para un arreglo de columnas geotécnicas distribuidas sobre la meseta de Mérida, utilizando una señal sísmica sintética caracterizada por el espectro de respuesta de la norma venezolana. Se elabora un mapa de microzonificación sísmica local para la ciudad de Mérida.

SUMMARY

A Local Seismic Hazard assessment has been performed selecting the Boconó Fault Zone (BFZ) as the principal seismogenic source. Maximum expected event is a 7.3 magnitude Richter scale earthquake with a return period of 3000 years. Surface response has been carried in a geotechnic columns array over Mérida's tableau, with Shake91 [Idriss y Sun, 1992] and EERA [Bardet et al., 2000], using as input a characterized synthetic signal by response spectra from Venezuelan seismic code. Local seismic microzoning map is developed for the city.

Introducción

La ciudad de Mérida, Venezuela, se encuentra ubicada en el occidente del país, sobre la cordillera Andina en una meseta dentro de un valle tectónico (graben) limitado por el NO y SE por las Sierras de La Culata y Nevada respectivamente. El valle está constituido por depósitos aluviales en forma de cono-terrazza, abanicos y terrazas fluviales, atravesado longitudinalmente por tres ríos: Chama, Mucujún y Albarregas. La ciudad tiene una configuración alargada (dirección SO – NE) con 14 Km de largo por 4 Km de ancho, en su porción central se encuentra el núcleo urbano antiguo en forma de damero (cuadrícula) con manzanas cuadradas de aproximadamente 100 m de lado, que corresponden a la configuración original de su fundación. Las características topográficas del terreno han determinado un crecimiento alargado en las direcciones SO y NE; la estructura física de la ciudad permanece prácticamente inalterada hasta la primera mitad del Siglo XX, en 1952 (Población 30.000 hab.) comienza la expansión con la construcción de nuevas avenidas hacia el SO y el NE y el aeropuerto de la ciudad, duplicando en dos décadas la superficie de la misma, en la década de los 70 se produce la conurbación de la ciudad de Mérida con los pueblos satélite al SO (La Punta y Ejido), y el crecimiento hacia la bancada NO del Río Albarregas con la construcción de un viaducto y varias avenidas permitiendo la expansión transversal sobre la meseta que se completa en la década de los 80 con la construcción de otros dos viaductos, en los 90 se construye la autopista hacia el sur con la inclusión de la

ciudad de El Vigía dentro del área de influencia de la Zona Metropolitana de Mérida (Población en 1990: 250.000 habitantes). La ciudad cumple funciones de administración y servicios para el resto de la región, tanto por ser sede del gobierno regional como por serlo de la Universidad de Los Andes, siendo ésta última institución la que da vida a la ciudad aportando directamente más de 60.000 habitantes a la misma.

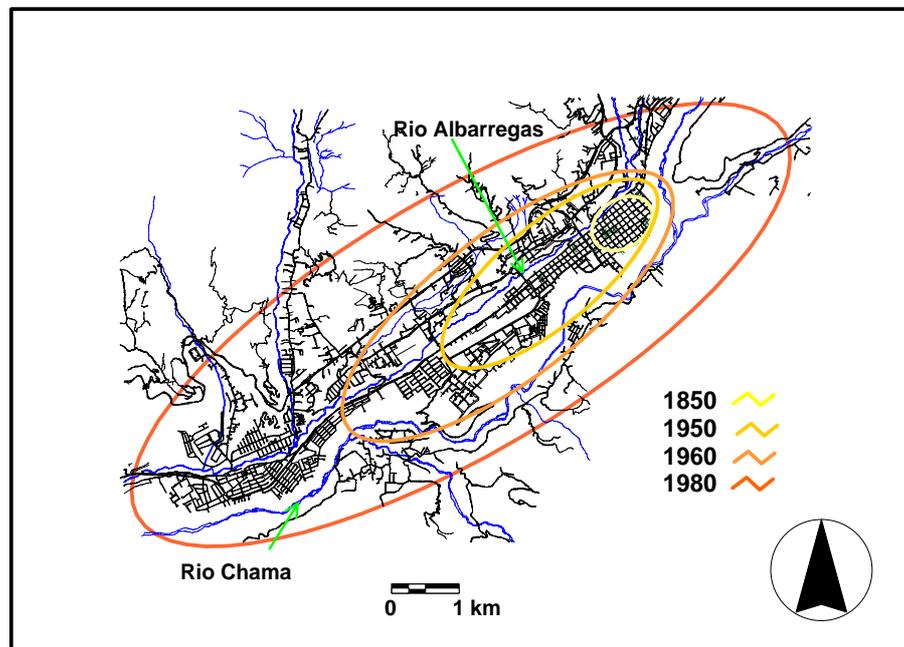


Figura 1: Expansión Urbana de Mérida.

La región en general está clasificada según la norma sísmica venezolana [COVENIN, 1998] como zona de alta incidencia sísmica o Zona 6 ($A_0 = 0,30 g$). Varios sismos destructores (1610, 1644, 1812, 1894) han azotado la ciudad de Mérida causando daños considerables. La sismicidad de la región tiene como fuente principal la Zona de Falla Boconó, franja de 100 Km de ancho por 600 Km de largo orientada en dirección SO – NE, atravesando el sistema andino venezolano desde la frontera con Colombia hasta la costa del Mar Caribe en el estado Falcón.

Objetivos

Los eventos sísmicos más probables, con sus respectivos períodos de retorno, se evaluarán a partir de un análisis probabilístico para los catálogos sísmicos disponibles. Se establecerá un mapa de peligrosidad sísmica local para la ciudad de Mérida en Venezuela, teniendo en cuenta efectos locales como amplificación en superficie y estabilidad de terrenos en pendiente. Para tal efecto, esta investigación se divide en tres etapas consecutivas:

1. Análisis probabilístico de la sismicidad para la ciudad de Mérida, utilizando como parámetro la Magnitud (M) de los eventos. Se obtendrán períodos de retorno y probabilidades de ocurrencia para eventos sísmicos.
2. Se calculará, con una señal sintética (adecuada al espectro de respuesta en superficie de la norma venezolana [COVENIN, 1998]), la respuesta en superficie para una serie de columnas geotécnicas obteniendo la frecuencia y amplificación máxima para cada una de éstas.
3. Elaboración de mapas de peligrosidad sísmica local.

Análisis probabilístico de sismicidad para Mérida

Se utilizan en éste análisis los catálogos:

- [USGS, 2001 a]: (SISRA) con 1003 eventos, combina eventos históricos con eventos instrumentales registrados por la red del USGS, partiendo del año 1644 hasta 1981.
- [USGS, 2001 b]: (NEIC) con 1031 eventos instrumentales registrados por la red del USGS desde 1973 hasta el 2001.
- [MOP, 1976]: con 549 eventos instrumentales, desde 1950 hasta 1970
- [FUNDAPRIS, 2001]: con 2141 eventos instrumentales de la Red Sísmica de Los Andes Venezolanos (REDSAV), desde 1989 hasta 1999.

La información de los catálogos se filtra por medio de la magnitud, estableciendo un umbral inferior de $M = 4$, y luego por su localización dentro del sector comprendido entre las coordenadas: Oeste 68° a 74° y Norte 6° a 13° , que comprenden el occidente venezolano integrando la ZFB dentro de los límites establecidos. Se complementan los cuatro catálogos mencionados arriba, el resultado tiene 689 eventos desde 1644 hasta el 2001.

Para el análisis probabilístico se ha utilizado una distribución asintótica de máximo valor [Benjamin y Cornell, 1970] ó Distribución Gumbel Tipo I, la función de distribución tiene la forma:

$$F_Y(y) = \exp\left[-e^{-\alpha(y-u)}\right] \quad -\infty \leq y \leq \infty \quad (1)$$

Donde, u = Moda de la muestra y α = Medida de dispersión, que tiene la forma:

$$\sigma_Y^2 = \frac{\pi^2}{6\alpha^2} \cong \frac{1.645}{\alpha^2} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \sqrt{\frac{1.645}{\sigma_Y^2}}$$

Realizando un análisis estadístico de los datos se obtienen la moda y varianza de la muestra, calculando los valores necesarios: $\alpha = 2.4032$ y $u = 4.0$, la expresión de la función de distribución es:

$$F_Y(y) = \exp\left[-e^{-2.4032(y-4.0)}\right] \quad -\infty \leq y \leq \infty \quad (2)$$

La probabilidad de que se supere un nivel de magnitud dado es:

$$P[Y > y_0] = 1 - F_Y(y) \quad (3)$$

Considerando que la probabilidad es la misma para las sucesivas unidades de tiempo, el período de retorno para la magnitud tiene la forma:

$$T(y) = \frac{1}{1 - F_Y(y)} \quad (4)$$

Con estas ecuaciones se han calculado las probabilidades y períodos de retorno (Ver Tabla 1) para eventos de diferentes magnitudes, con un límite superior de $M = 7.3$, que es la

máxima magnitud registrada en los catálogos.

Los eventos más probables se encuentran en el rango de magnitudes entre 4.0 y 5.9 M , la magnitud máxima dentro del análisis es $M = 7.3$ con un período de retorno bastante extenso: 3000 años. Resultados equivalentes se encuentran en [Bendito, 2000], basado en un análisis probabilista de los mismos catálogos utilizados en la presente investigación, obteniendo períodos de retorno para $M = 6.5$ y $M = 6.4$ de 410 y 263 años respectivamente. Estos resultados contrastan con las conclusiones basadas en consideraciones geológicas y geofísicas de [Garciaacaro, 1997], en las cuales se establece de manera determinista un período de retorno $T \cong 250$ años para el evento máximo esperado de $M = 7.5$, por los desplazamientos (Transcurrente Lateral Dextral) en la traza principal de la Zona de Falla de Boconó ($\cong 1$ cm / año) y suponiendo que tal evento se origina por una ruptura con un desplazamiento de aproximadamente 2.5 m, similar a la que se presume ocurrió el 26/03/1812. Sin embargo, debido a la naturaleza diferente de éstas dos aproximaciones (Probabilista – Determinista) es de esperar que se produzcan diferencias sustanciales al momento de estimar períodos de retorno.

Magnitud	Probabilidad	Período de Retorno (años)
4.0	0.6232	1.6
5.0	0.08646	12
5.5	2.683×10^{-2}	37
5.9	1.035×10^{-2}	97
6.0	8.144×10^{-3}	123
6.2	5.044×10^{-3}	198
6.4	3.122×10^{-3}	320
6.5	2.456×10^{-3}	407
6.7	1.520×10^{-3}	658
6.9	9.399×10^{-4}	1064
7.0	7.391×10^{-4}	1353
7.1	5.813×10^{-4}	1720
7.2	4.572×10^{-4}	2187
7.3	3.595×10^{-4}	2782

Tabla 1: Probabilidades y Períodos de Retorno para distintas Magnitudes.

Respuesta en superficie para columnas geotécnicas

Para la obtención de respuesta en superficie, se utiliza una señal sintética caracterizada por el espectro de la norma sismorresistente venezolana [COVENIN, 1998] (ver Figura 2), con una envolvente en forma de trapecio y un escalado a $A_0 = 0.30g$ (máxima aceleración horizontal considerada en la norma), la razón para utilizar una señal de estas características se debe a la ausencia de una colección de registros acelerográficos para la meseta de Mérida.

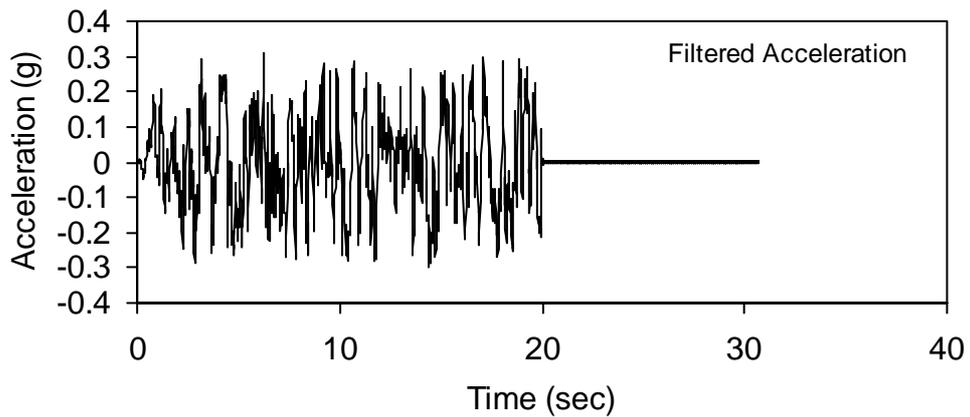


Figura 2: Acelerograma sintético

El subsuelo de la meseta de Mérida se caracteriza por dos tipos de suelos, dependiendo de su posición geográfica con respecto al Río Albarregas: arcillo-arenosos con poca grava, al Norte y areno-limosos con grava, al Sur. El subsuelo, a partir de una profundidad promedio mayor de 10 metros es similar en ambas zonas, presentando peñones, cantos y gravas en una matriz areno-limosa y/o areno-arcillosa. Debido a que en éstas las velocidades de propagación de las ondas sísmicas se corresponden a las de un estrato consolidado, bien puede considerarse su comportamiento semejante al de la roca o basamento [MOP, 1976].

Para seis secciones sobre la meseta de Mérida, dos longitudinales y cuatro transversales, se infieren las columnas geotécnicas (265 en total), aproximadamente cada 100 m. En función de la información disponible en las secciones, se consideran dos estratos para cada una de las columnas: Superficial e Intermedio, sobre un basamento con velocidades de ondas de corte superiores a los 1100 m/s. El análisis se realiza por medio de SHAKE91 [Idriss y Sun, 1992]. Las características de los estratos se muestran en la Tabla 2.

Ubicación con respecto al Río Albarregas	Estrato	Composición	Peso Unitario (kN/m ³)	$G_{m\acute{a}x}$ (MPa)	V_s (m/s)
Norte	Superficial	Arcilla Arenosa con Grava	18.86	134.35	-
Norte	Intermedio	Arena limosa con Grava	19.64	105.107	-
Sur	Superficial	Arena Limosa con Grava	19.64	63.30	-
Sur	Intermedio	Grava Arenosa con Limo	20.43	123.20	-
Norte y Sur	Basamento	Peñones, Cantos y Gravas	22.06	-	1180

Tabla 2: Características de los estratos [MOP, 1976]

Debido a la diferencia de composición de los suelos al Norte y Sur del Río Albarregas, se han analizado, por medio de EERA [Bardet et al., 2000], sendas columnas tipificadas que representan las condiciones promedio de los suelos respectivos, con espesores y profundidades idénticas para cada uno de los estratos.

En general, el Factor de Amplificación en superficie (FA) tiene un rango de 3 a 15 veces la señal de entrada, para Períodos (T) comprendidos entre 0.44 y 4 s. Como se puede observar en la Figura 3, FA y T tienen valores máximos donde el estrato superficial alcanza profundidades mayores. En los Mapas 1 y 2, se representan los resultados en las secciones para Períodos y Factores de Amplificación de respuesta respectivamente, con el mapa de profundidades inferidas del primer estrato [MOP, 1976] y la imagen sombreada de la topografía. Se observa claramente como los FA aumentan con la profundidad. De igual manera se comportan los períodos de respuesta con relación a las profundidades del primer estrato.

Una primera aproximación para la microzonificación de la peligrosidad sísmica se puede establecer basándose en el mapa de profundidades inferidas del primer estrato, ya que por medio de éste es posible inferir zonas propensas a la amplificación por su mayor o menor profundidad.

Es importante recalcar que debido a la utilización de un único acelerograma sintético adecuado al espectro de respuesta en superficie de la zona, los resultados no son concluyentes, sin embargo, se pueden establecer valoraciones cualitativas útiles para estudios posteriores. Con el objetivo de obtener resultados cuantitativos aceptables es necesario utilizar una colección de acelerogramas de la zona, no disponibles en la actualidad.

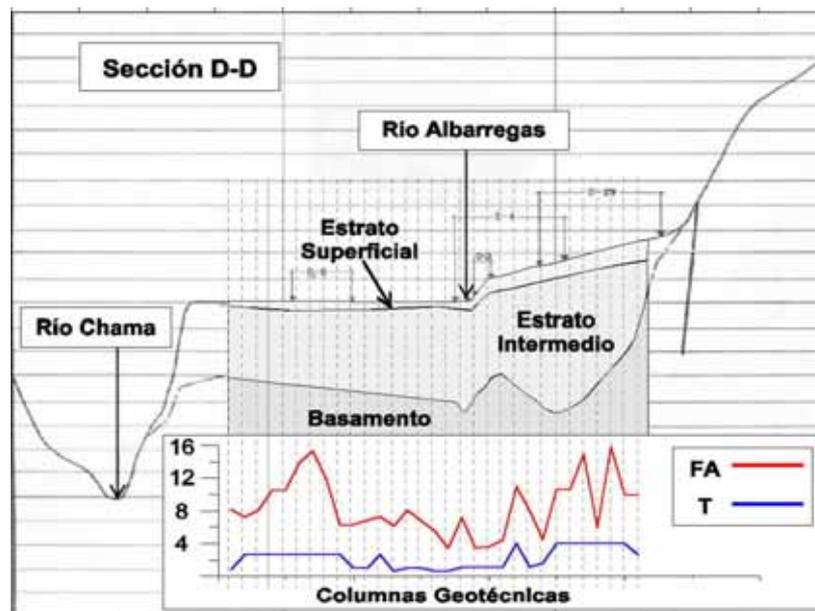
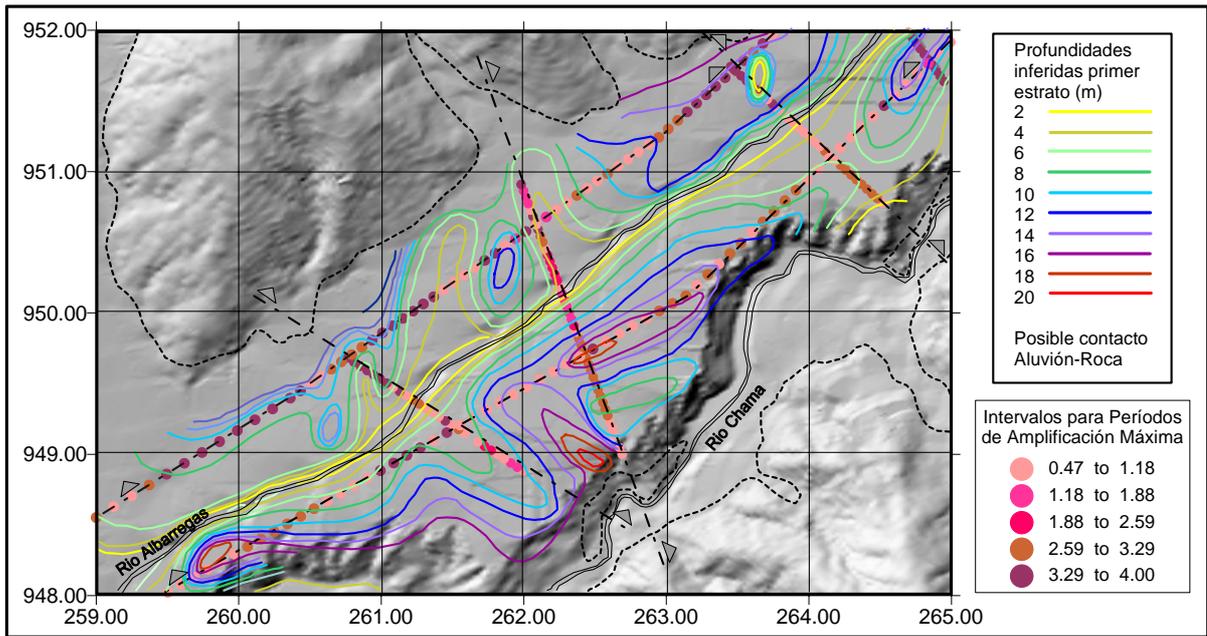
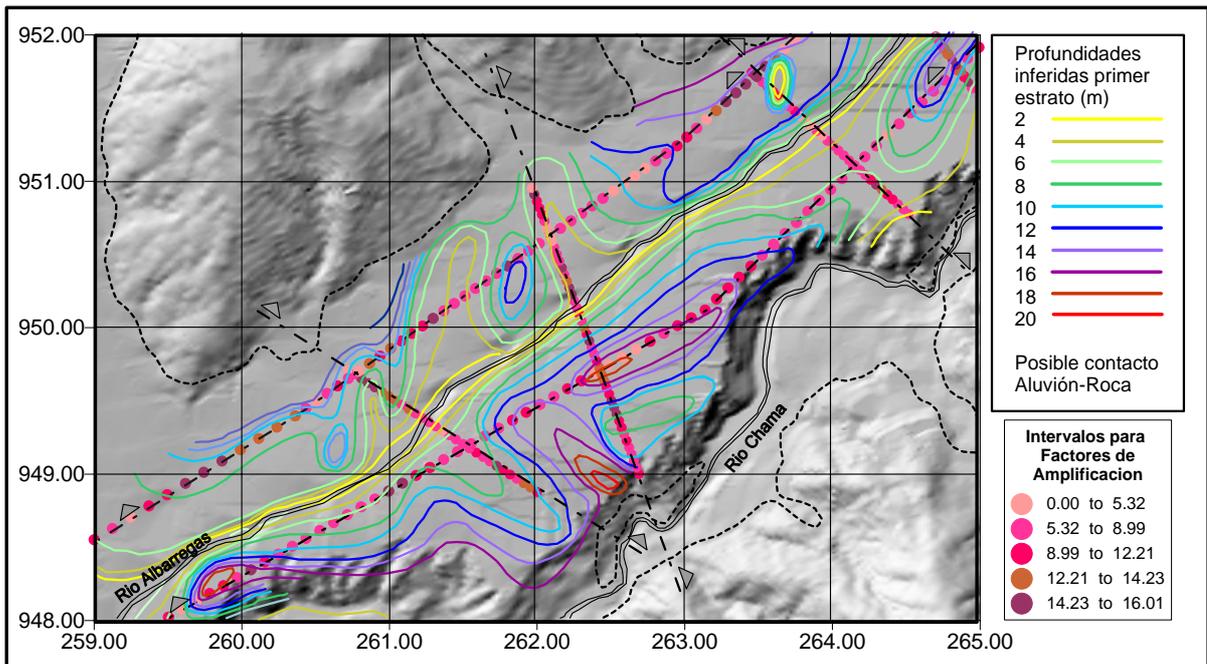


Figura 3: Sección D-D, con Factores de Amplificación y Períodos.

El análisis de las dos columnas tipificadas permite establecer una diferencia entre los suelos, los valores máximos de la aceleración espectral para la columna al Sur del Albarregas son aproximadamente un 10% mayores que los del Norte con un período $T = 0.43s$ en ambos casos. Los valores de FA tienen una diferencia mayor en porcentaje, en este caso las amplificaciones tienen una diferencia del 30% para períodos muy similares, en el orden de $T = 0.42s$ y $T = 0.46s$ para las columnas Norte y Sur respectivamente. Las columnas tipificadas suponen condiciones promedio del suelo de la zona, caracterizando cada una de las porciones de la meseta de Mérida a ambos lados del río Albarregas, esto conduce a establecer una discriminación entre éstas.



Mapa 1: Períodos de amplificación de respuesta en superficie.



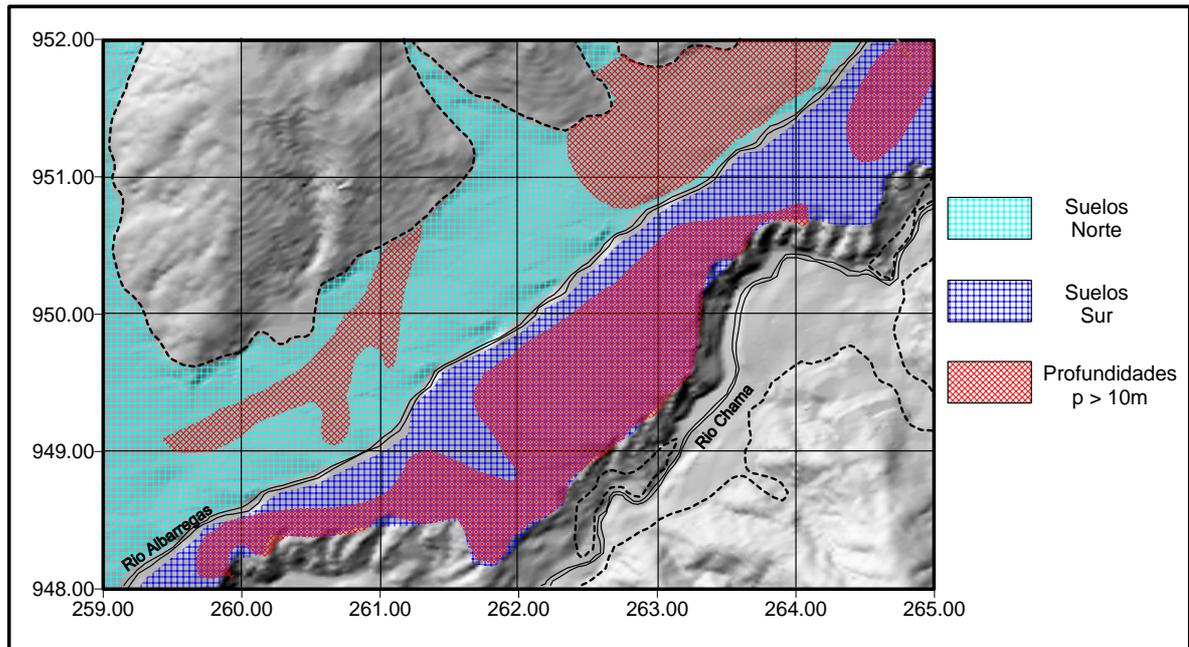
Mapa 2: Factores de amplificación de respuesta en superficie.

Con los resultados obtenidos se puede establecer una microzonificación preliminar de la siguiente manera:

1. Una primera división general utilizando el eje del río Albarregas, para separar en dos porciones los suelos de la meseta. Las amplificaciones esperadas en superficie para la porción Sur son un 10% mayores que en la Norte.
2. Dentro de cada una de estas zonas se identifican suelos con profundidades entre 12

y 20 m, configurando áreas cuyas amplificaciones en superficie posiblemente tengan mayores magnitudes.

En el Mapa 3 se pueden apreciar las zonas descritas arriba, es notable cómo la superposición del tipo de suelo con las profundidades configura una zona bastante problemática sobre el extremo Sureste de la meseta, pues además del efecto de amplificación superpuesta, se encuentra el borde de la meseta hacia el Río Chama, con pendientes de terreno superiores al 30%.



Mapa 3: Microzonificación preliminar propuesta para la meseta.

Conclusiones

Los períodos de retorno para eventos con magnitudes entre 4 y 5.9, son inferiores a 100 años, para el máximo evento registrado $M = 7.3$, el período de retorno es bastante más amplio: 3000 años. En localizaciones donde el primer estrato tiene profundidades superiores a los 12 m se verifican mayores amplificaciones. Existe una diferenciación entre los suelos al Norte y Sur del río Albarregas, siendo el espectro de aceleraciones absolutas un 10% mayores para el segundo. Estas diferencias conforman la base de la microzonificación propuesta para la meseta de Mérida.

Referencias:

- COVENIN (1998), Norma COVENIN 1756-98 Edificaciones Sismorresistentes, FUNVISIS, Caracas.
- Idriss I. M., Sun J.I. (1992), SHAKE91 A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontal Layered Soil Deposits, University of California, California.
- Bardet J.P., Ichii K. and Lin C.H. (2000), EERA A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits, University of Southern Carolina, Department of Civil Engineering.

- Bendito A. (2000), Análisis de sismicidad y curvas de isoaceleración para estados de desempeño estructural en el occidente venezolano. Tesis de Maestría, Postgrado en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Mérida.
- Garciaccaro E., (1997), Microsismicidad, tectónica y potencial sísmico en el sistema de fallas de Boconó”, Proyecto de grado presentado ante la ilustre Universidad Simón Bolívar como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Geofísico, Sartenejas.
- M.O.P., (1976), Microzonificación sísmica para la meseta de Mérida, Ministerio de Obras Públicas, Caracas.
- Benjamín J. y Cornell A., (1970), Probabilidad y estadística en la Ingeniería Civil, McGraw-Hill, Bogotá.
- U.S.G.S., a, (2000), Catálogo: USGS/NEIC (PDE) 1973 – Present, obtenido en: http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html.
- U.S.G.S., b, (2000), Catálogo: South America, 1471 – 1981, obtenido en: http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido el soporte financiero de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) del Gobierno Español, Proyectos de Investigación AMB98-0558 y REN2000-1740 y por la Subdirección General de Investigación del MCYT, Proyecto de Investigación PB98-0455. La estancia del Sr. Castillo en Barcelona es apoyada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) de Venezuela, Beca No. 199601500, y por la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.