

VELOCIDADES PROMEDIOS DE ONDAS DE CORTE EN LOS PRIMEROS 30 M DE PROFUNDIDAD (Vs30), INFERIDAS A PARTIR DEL RELIEVE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE CARACAS

CÉCILIO MORALES¹, JULIO J. HERNÁNDEZ², MICHAEL SCHMITZ¹, VÍCTOR CANO¹ Y MAURICIO TAGLIAFERRO¹

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

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

Recibido: octubre de 2009

Recibido en forma final revisado: julio de 2011

RESUMEN

Uno de los parámetros geofísicos ampliamente empleados para estimar la respuesta sísmica en un sitio determinado, lo constituye el promedio de las velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m de espesor (Vs30), el cual fue utilizado como uno de los índices del estudio paramétrico de respuestas 1D de sitios, junto con el espesor de sedimentos, en el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas. Dado que la velocidad de onda de corte se relaciona con la rigidez (módulo de corte) y la densidad del material por donde esta se propaga, y que se manifiesta además en la competencia del material a la erosión y en la pendiente topográfica (a mayor pendiente, mayor Vs30), lo que permite establecer correlaciones, recientemente desarrolladas, entre el promedio Vs30 y el relieve topográfico. En el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, se emplearon estos resultados para extender el mapa de distribución de Vs30 a las zonas fuera del valle con poca información geotécnica, con el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener las pendientes. En el mapa obtenido se puede observar zonas con meteorización diferencial en los cerros y colinas según el valor de Vs30. Estos resultados fueron agregados a los obtenidos a través de relaciones empíricas NSPT-Vs para el valle sedimentario de Caracas, generándose un nuevo mapa integrado de distribución Vs30 en el Área Metropolitana de Caracas (AMC). Fue así posible disponer de uno de los insumos necesarios, en conjunción con otras fuentes de información y el estudio paramétrico citado, para cumplir con el objetivo principal planteado, el cual era definir microzonas sísmicas en toda el AMC.

Palabras clave: Vs30, Pendiente topográfica, Microzonificación sísmica, Onda de corte, Caracas.

AVERAGE SHEAR WAVE VELOCITIES IN THE FIRST 30 M DEPTH (Vs30), INFERRED FROM THE TOPOGRAPHIC SLOPE IN THE METROPOLITAN AREA OF CARACAS

ABSTRACT

Average shear wave velocity in the upper 30 m (Vs30) is one of the geophysical parameters used at great length for estimating the site seismic responses, and it was employed as an index in the parametric 1D site response study for the Caracas Seismic Microzoning Project. It is known that shear wave velocity is related with stiffness (shear modulus) and density and it becomes apparent in endurance to erosion and in topographic slope (high topographic slope: high Vs30 value), leading to recent published relations between Vs30 and relief. This methodology was taken for the Caracas Seismic Microzoning Project, in order to extend the Vs30 distribution map to the out-valley zones with little geotechnical information, by means of GIS technologies. In the new map we can infer differential rock weathering at hills. These results were added to those obtained with a NSPT-Vs relationship for the Caracas sedimentary valley, leading to a Vs30 integrated map for the Caracas Metropolitan Area (AMC). Then, we could have to our disposal a necessary input, together with other technical data and the parametric study, for defining microzones in the whole AMC.

Keywords: Vs30, Topographic slope, Seismic microzoning, Average shear wave, Caracas.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que determina la ampliación del movimiento sísmico superficial respecto al basamento rocoso, exhibiendo los “efectos de sitio”, lo constituye la configuración y propiedades de los estratos

superficiales (Bard & Bouchon, 1980). En diversas recomendaciones internacionales, tales como las del NEHRP (BSSC, 2003) o el EUROCODE 8 (CEN, 2003), la calidad del suelo superficial es indicada mediante el promedio de la velocidad de propagación de las ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30). De manera parecida, la

norma sísmica venezolana (COVENIN, 2001), utiliza la velocidad promedio de las ondas de corte para la definición de los perfiles de suelo, pero en espesor variable. Ahora bien, para el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas y Barquisimeto, se desarrolló un estudio paramétrico de respuesta de sitios, en el cual los índices principales fueron Vs30 y el espesor de sedimentos o, lo que representa lo mismo, la profundidad del basamento rocoso (Hernández *et al.* 2009). Se acogieron dichas tendencias normativas internacionales y diversas investigaciones que muestran que el promedio Vs30 es un indicador conveniente al respecto (Choi & Stewart, 2005), pero reconociendo también la importancia del citado espesor. Adicionalmente, a estos parámetros se añaden los efectos 2D-3D de cuenca para construir los espectros recomendados de diseño (Hernández & Schmitz, 2009). Para utilizar estos resultados es necesario establecer los valores de Vs30 en los diversos sectores del Área Metropolitana de Caracas (AMC). Sin embargo, como la información geotécnica disponible no las abarca todas, resultó conveniente emplear una metodología de inferencia aproximada a partir de las pendientes topográficas. En tal sentido, Wald & Allen (2007) propusieron una técnica para estimar los valores de Vs30 a partir de la topografía de la zona. Este trabajo tomó en cuenta estudios regionales previos que apuntaban sobre esa relación (Matsuoka *et al.* 2005; Thelen *et al.* 2006), efectuando una amplia estadística mundial que soporta la validez general aproximada de correlaciones entre el valor de Vs30 y la pendiente topográfica promediada con determinada resolución, diferenciando las regiones tectónicas activas y las continentales estables. En los trabajos iniciales (Wald & Allen, 2007; Allen & Wald, 2007), se presentaron relaciones entre Vs30 y la pendiente promediada con resolución de 30" de arco (926 m). Mientras que en un trabajo reciente (Allen & Wald, 2009), se presentaron nuevas relaciones para usar con la pendiente promediada con resolución de 9" de arco (278 m), destacando la importancia de que se usen las relaciones asociadas con las respectivas resoluciones y no se empleen

pendientes calculadas con resoluciones diferentes a las indicadas.

En el presente trabajo se expone la generación de un mapa de Vs30 para el Área Metropolitana de Caracas (AMC), comprendiendo sus cinco municipios (Libertador, Chacao, Sucre, Baruta y El Hatillo), utilizando los resultados de Allen & Wald (2009) para resolución de 9" de arco en regiones activas, con una resolución de 300 m (SRTM). Se comparó este nuevo mapa con el mapa de Vs30 elaborado por Morales *et al.* (2008) para el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas a partir de relaciones empíricas de conversión N_{SPT}-Vs, y se generó una nueva versión actualizada del mismo.

METODOLOGÍA

A continuación se presenta una descripción de las fases en las que se basó este estudio:

Fase I: Revisión bibliográfica y ajuste funcional:

A la relación entre el Vs30 y la pendiente topográfica (p) en regímenes activos, propuesta por Allen & Wald (2009) para 9" de arco, y definida en una tabla de valores numéricos (Tabla 1), se le realizó un ajuste racional-polinómico obteniéndose la siguiente expresión válida para $p \leq 0,2$:

$$V_{s30} = \frac{2046p^3 + 1612p^2 + 377.4p + 1.259}{p + 0.007324} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

Donde: p es el valor de la pendiente en unidades naturales (m/m). En la figura 1 se observa el ajuste alcanzado, con errores menores de 0,3 m/s para los datos básicos. Sin embargo, el resultado crece indefinidamente con p y debe ser acotado. En la aplicación se limitó el valor máximo de Vs30 a 800 m/s (obtenido para $p = 0,216 = 12,2^\circ$), pero sólo se distinguieron gráficamente las áreas con $V_{s30} \geq 650 \text{ m/s}$ ($p \geq 0,153 = 8,7^\circ$).

Tabla 1. Relación entre la pendiente topográfica y las categorías de Vs30 según NEHRP (BSSC, 2003). Se muestran los respectivos rangos de topografía (Allen & Wald, 2009).

Clasificación de sitios NEHRP	Rango Vs30 (m/s)	Rango de gradiente (m/m) para 9 arcsec en regímenes activos
E	< 180	< 3×10^{-4}
	180 - 240	$3,5 \times 10^{-4} - 3,5 \times 10^{-3}$
	240 - 300	$3,5 \times 10^{-3} - 0,010$
D	300 - 360	0,010 - 0,024
	360 - 490	0,024 - 0,08
C	490 - 620	0,018 - 0,14
	620 - 760	0,14 - 0,20
B	> 760	> 0,20

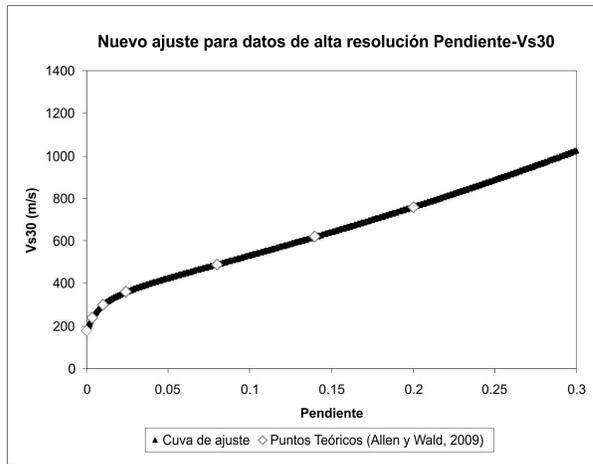


Figura 1. Curva de ajuste racional-polinómica según (1), obtenida a partir de los datos de Vs30 y pendientes topográficas de Allen & Wald (2009).

Fase II: Obtención de los valores de pendientes para el AMC y generación del mapa Vs30 aproximado:

Para realizar el cálculo de Vs30 en el AMC, se tomó el Modelo Digital del Terreno –MDT– a partir de los datos de altura de las imágenes SRTM descargadas desde Global Land Cover Facility –GLCF– (www.landcover.org), a través del cual se obtuvo el mapa de pendientes expresadas en porcentaje (Figura 2), con un tamaño de celda de 300 m por 300 m. Este mapa en formato raster es el parámetro necesario para el cálculo del Vs30 según la expresión (1). Utilizando la herramienta ModelBuilder de ESRI (2005), se construyó un flujograma de procesos aplicados a cada celda de la imagen de raster de pendiente, que siguiera las reglas establecidas en (1) a fin de calcular las velocidades Vs30 en cada celda.

PRINCIPALES RESULTADOS

Aplicando el procedimiento descrito arriba, se generó un mapa detallado (malla de 300 m por 300 m) de distribución de valores Vs30 obtenidos a partir de datos topográficos de la pendiente (Figura 3). En concordancia con las definiciones establecidas en el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, las velocidades Vs30 obtenidas a través de esta metodología fueron agrupadas en 3 rangos representativos: entre 185 y 325 m/s, entre 325 y 650 m/s y mayores que 650 m/s (Schmitz *et al.* 2009). Estos rangos de velocidades corresponden a los seleccionados para agrupar los perfiles del terreno utilizados en el citado estudio paramétrico (Schmitz *et al.* 2009; Hernández *et al.* 2009).

Se obtuvo para la mayor parte del valle sedimentario de Caracas (sedimentos cuaternarios) un rango de valores entre 325 y 650 m/s delimitando muy bien el contacto roca-sedimento en la parte norte, en donde la velocidad aumenta a valores mayores que 650 m/s. En las riberas de los ríos Valle (zona del centro al sur del valle) y Guaire (sur del valle sedimentario), se observan velocidades intermedias entre 185 y 325 m/s atribuidas a los sedimentos provenientes de las planicies de inundación y sedimentos lacustres descritos por Singer *et al.* (2007).

Se pueden distinguir zonas con meteorización diferencial según el valor Vs30 calculado, asociado con las pendientes existentes. Por ejemplo, en la zona sureste del mapa se observa un gran área con velocidades entre 325 y 650 m/s, asociadas con pendientes entre 1,5% y 15% ($0,84^\circ < p \leq 8,7^\circ$), que se pueden atribuir a las zonas alveolares de me-

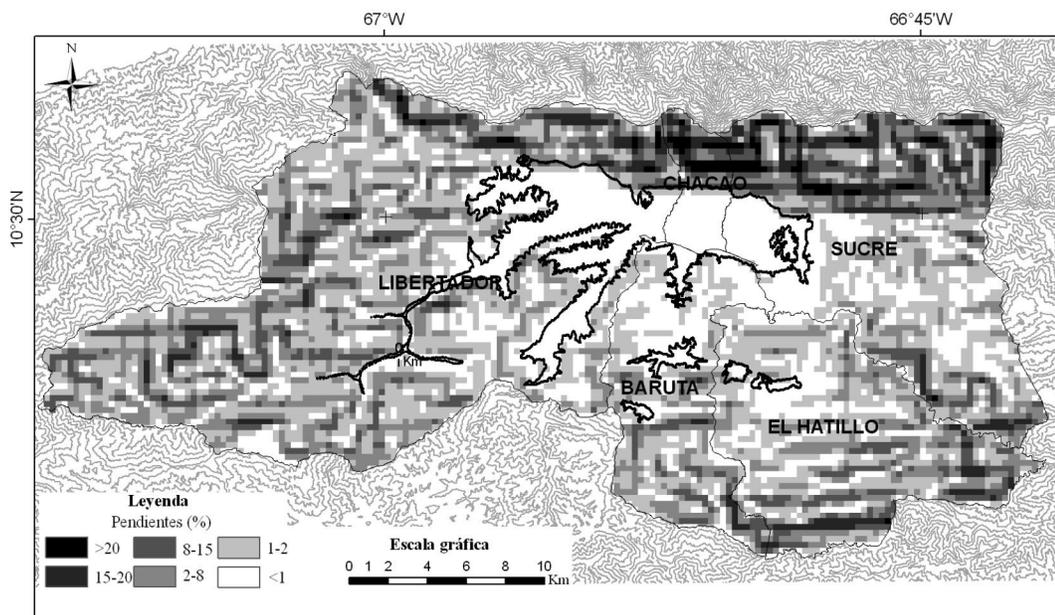


Figura 2. Mapa de pendientes en porcentaje, rasterizado para el AMC utilizando como base el mapa SRTM (Global Land Cover Facility).

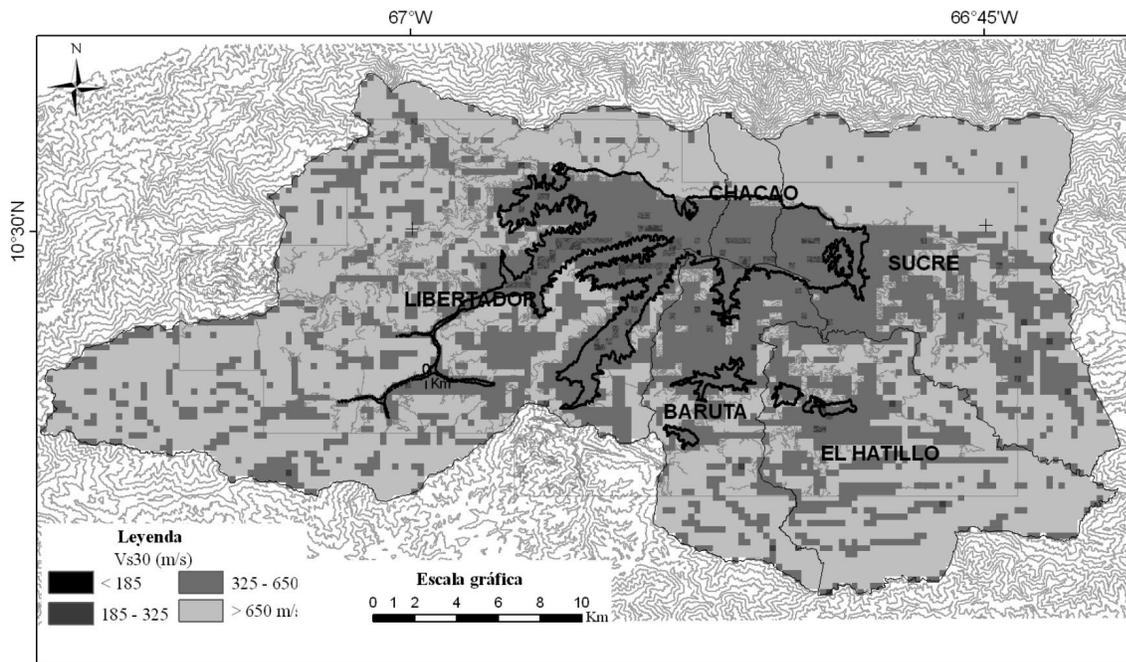


Figura 3. Mapa de distribución de Vs30 para el AMC. En línea negra gruesa se indica el contacto roca – sedimento derivado de las observaciones geológicas.

teorización de Cumbres de Curumo (1), Valle Arriba (2), El Hatillo (3), Sartenejal (4), Baruta (5) y La Trinidad (6), reconocidos por Singer (1977). Adicionalmente, en la zona este del mapa, hacia La Urbina (7) en el este del valle sedimentario, se observan velocidades con el mismo rango para la roca meteorizada del Esquistos Las Mercedes. Los espectros para estas zonas sufren fuertes amplificaciones para períodos cortos. A partir de $p > 15\%$ ($p > 8,7^\circ$) a las laderas de cerros y colinas se asigna $Vs30 > 650$ m/s y se les aplica el espectro mínimo de roca si $p < 40\% = 22^\circ$, mientras que pueden sufrir efectos topográficos si $p \geq 40\%$ (Hernández & Schmitz, 2009). Además, para las laderas con $p \leq 15\%$ en otro estudio del proyecto, se obtuvo casi siempre peligro de deslizamiento sísmico bajo o muy bajo (Hernández *et al.* 2008), independientemente de su caracterización geotécnica y ubicación. En síntesis, la frontera definida por $Vs30 = 650$ m/s, que se delineó en este estudio, separa las áreas con espectros con amplificaciones por estratos superficiales (suelo o roca meteorizada) sin gran peligro de deslizamientos, de aquellas áreas con espectros de roca sin o con efectos topográficos y eventual peligro grave de deslizamientos.

Integración de los resultados

Con antelación, se disponía para el valle sedimentario de Caracas de un mapa parcial de distribución de Vs30 calculado a partir de relaciones empíricas entre el número de golpes N de ensayos SPT y las velocidades de ondas de corte (Figura 4). Este mapa se obtuvo después de aplicar una relación NSPT-Vs (Morales *et al.* 2008), obtenida a partir de los rangos de valores de la tabla de clasificación de

suelos y sitios de las recomendaciones del NEHRP (BSSC, 2003) a una base de datos de ensayos SPT (≈ 1000 perforaciones) realizados en Caracas (Feliziani *et al.* 2004), utilizando un SIG. Los promedios de velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad ($Vs30$) en el valle sedimentario varían entre 170 y 600 m/s. En el mapa $Vs30$ (Figura 4) se subdividen las velocidades de ondas de corte en 3 rangos: menor que 185 m/s, entre 185 y 325 m/s y mayor que 325 m/s. La distribución espacial de $Vs30$ está igualmente relacionada con la geología del valle aluvial de Caracas (Singer *et al.* 2007), porque sus mayores valores se observan hacia la parte norte del valle (pie de montaña). En la zona occidental se observan predominantemente valores altos debido a la cercanía del estrato rocoso a la superficie (zona alveolar residual) y al afloramiento rocoso correspondiente a los Esquistos de Las Brisas. De igual manera se observan valores altos en los afloramientos de Los Esquistos de las Mercedes en La Urbina (7) y Bello Monte (8). Por otro lado, los valores mínimos se observan en las zonas de sedimentos lacustres hacia el centro del mapa. Adicionalmente los valores intermedios se observan a lo largo y ancho de las riberas de los ríos Guaire (de oeste a este) y Valle, desde la parte central del mapa hacia el sur, lugares en los cuales se reportan sedimentos lacustres en menor cantidad (Singer *et al.* 2007). Debe comentarse, no obstante, que la propuesta de microzonas del último trabajo citado no puede acogerse porque sólo toma en cuenta aspectos geológicos, mientras que la definición del Proyecto incluye aspectos sismogénicos, geológicos, geofísicos, geotécnicos e ingenieriles.

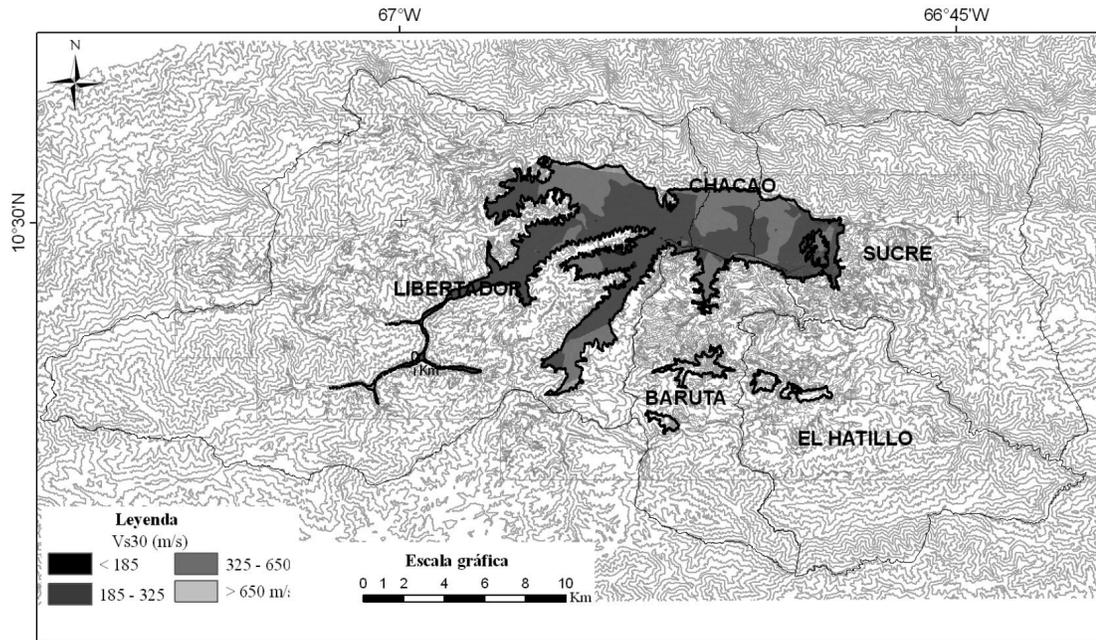


Figura 4. Mapa de Vs30 calculado a partir de conversiones N_{SPT} -Vs para el valle aluvial de Caracas (Morales *et al.* 2008) sobre la base de las perforaciones geotécnicas reportadas por Feliziani *et al.* 2004.

El citado mapa de distribución parcial de Vs30 (Figura 4) no incluye valores fuera del valle sedimentario de Caracas, debido a que la densidad de perforaciones en estas zonas (reportadas en la base de datos antedicha) es pobre. Como una opción conservadora para el proyecto, se decidió usar un mapa integral de distribución de Vs30 para el AMC (Figura 5), a partir de los resultados de ambas metodologías. Para las zonas fuera del valle sedimentario (zona de cerros y colinas en el AMC) se utilizaron los obtenidos a partir

de las pendientes topográficas y para la zona propias del valle sedimentario se utilizaron los obtenidos con el ajuste expuesto en Morales *et al.* (2008) (Figuras 3 y 4, respectivamente). Adicionalmente, este mapa (Figura 5) se comparó con los resultados obtenidos en diversas campañas de ensayos sísmicos *in situ*, con fines de obtención de Vs30, realizados en el AMC, dentro y fuera del valle sedimentario de Caracas (García *et al.* 2006; Morales *et al.* 2008).

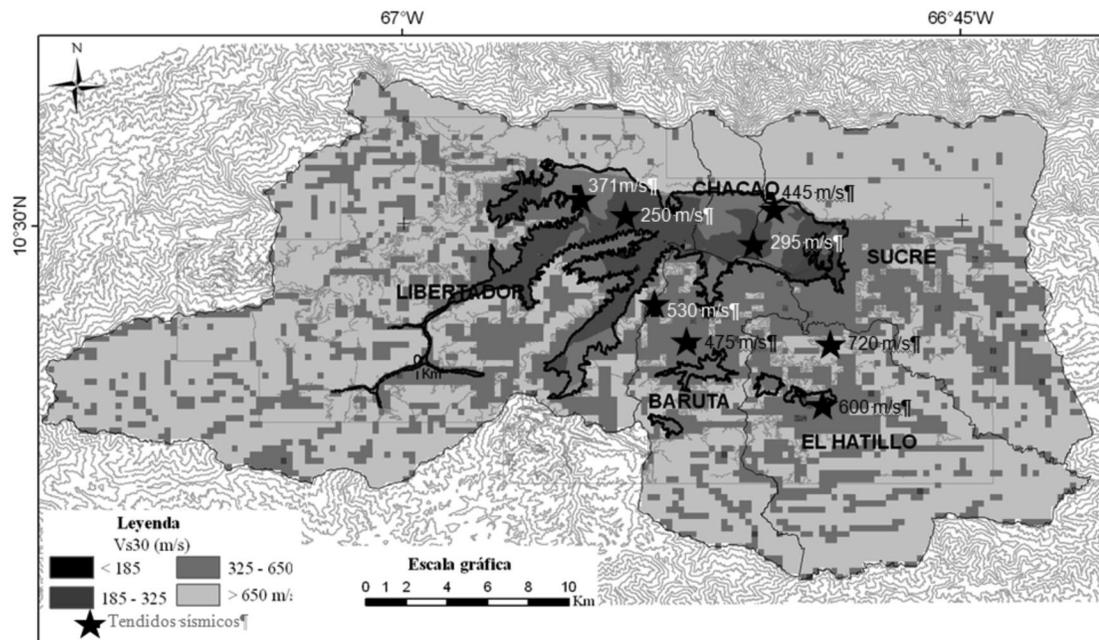


Figura 5. Mapa de Vs30 integrado a partir de conversiones N_{SPT} -Vs y estimaciones con las pendientes topográficas del AMC. Las estrellas representan los lugares en donde se ha realizado adquisición *in situ* de datos sísmicos.

AGRADECIMIENTOS

Estudio desarrollado en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT–BID II 2004000738). A TRX Consulting y Aldo Cataldi por los datos de Refraction Microtremor (ReMi)..

REFERENCIAS

- ALLEN, T. & WALD, D. (2007). *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (V_s30) and Amplification Around the globe*. Open-File Report 2007–1357. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- ALLEN, T. & WALD, D. (2009). *On the use of High-Resolution Topographic Data as proxy for seismic site conditions (V_s30)*. Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2A, pp. 935-943.
- BARD, P-Y. & BOUCHON, M. (1980). *The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, No. 4, pp. 1263-1286.
- BSSC. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450)*. Building Seismic Safety Council (BSSC), NIBS, Washington.
- CEN. (2003). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. European Standard, English version, 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, Volume 21, No. 1, pp 1–30.
- COVENIN. (2001). *Edificaciones sismorresistentes, COVENIN 1756:2001*. Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas, 113 pp.
- ESRI. (2005). *Programa ArcGis versión 9.1 módulo Model Builder*, Enviromental Systems Research Institute.
- 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, CD, 22 pp.
- 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 sísmica de refracción*. VIII CONVESIS, Valencia, 2006, Memorias en CD, 9 pp.
- GLOBAL LAND COVER FACILITY (GLCF). *University of Maryland. SRTM data*. [On line] www.landcover.org (última visita: 08 de diciembre 2008).
- HERNÁNDEZ, J.J. & SCHMITZ, M. (2009). *Espectros de diseño para microzonas*. Subcapítulo 6.4, Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, FUNVISIS.
- 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*. 50 Aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, Memorias, 14 p.
- HERNÁNDEZ, J.J., SCHMITZ, M., DELAUAUD, É., CADET, H., DOMÍNGUEZ, J. (2009). *Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas considerando efectos de sitio 1D, 2D y 3D*. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4 p.
- INAZAKI, T. (2006). *"Relationship between S-wave velocities and geotechnical properties of alluvial Sediments"*. Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan.
- MATSUOKA, M., WAKAMATSU, K., FUJIMOTO, K., MIDORIKAWA, S. (2005). *Nationwide site amplification zoning using GIS-based Japan engineering geomorphologic classification map*, *International Conference on Structural Safety and Reliability*, 9, Rome, Italy, June 19-23, 2005, Proceedings: Rotterdam, Netherlands, Millpress, p. 239–246.
- MORALES, C., SCHMITZ, M., GONZÁLEZ, M., CATALDI, A., ROJAS, H., ROJAS, S. Y MASY, J. (2008). *Aplicación de métodos geofísicos para la caracterización de sitios en el estudio de microzonificación sísmica de Caracas*. Conferencia 50 aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia. Caracas, Venezuela.
- SCHMITZ, M., HERNÁNDEZ, J., MORALES, C., MOLINA, D., VALLEÉ, M., TAGLIAFERRO, M., DOMÍNGUEZ, J., AMARÍS, E., GONZÁLEZ, M. Y LEAL, V. (2009). *Principales Resultados del Proyecto de Microzonificación Sísmica en Caracas y Estrategias para su Implementación*. V Coloquio Sobre Microzonificación Sísmica. Caracas. 4 pp.

- SINGER, A. (1977). *Síntesis regional de la evolución geomorfológica de la Cordillera de la Costa en el área de Caracas, Excursión No. 1*. V Congreso Geológico Venezolano, Caracas, Tomo V, pp. 55-72.
- 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, Octubre 2007, Memorias.
- THELEN, W., CLARK, M., LÓPEZ, C., LOUGHNER, C., PARK, H., SCOTT, J., SMITH, S., GRESCHKE, B., y LOUIE, J. (2006). *A transect of 200 shallow shear-velocity profiles across the Los Angeles basin*. Bull. Seism. Soc. Am., v. 96, no. 3, p. 1055–1067.
- WALD, D. & ALLEN, T. (2007). *Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification*. Bull. Seism. Soc. Am., v. 97, no. 5, p. 1379–1395.