

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE PERFILES GEOTÉCNICOS DE CARIACO (ESTADO SUCRE, VENEZUELA), PARTIENDO DE DATOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

JORGE GONZÁLEZ Y MICHAEL SCHMITZ

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).
e-mail: jgonzalez@funvisis.gob.ve, e-mail: mschmitz@funvisis.gob.ve

Recibido: abril de 2006

Recibido en forma final revisado: abril de 2008

RESUMEN

El pueblo de Cariaco en el noreste de Venezuela, ubicado en la cercanía de la Falla El Pilar, sufrió severos daños durante el terremoto de Cariaco de 1997. Posterior al sismo se realizaron evaluaciones geotécnicas del subsuelo y mediciones sísmicas de refracción. Se adquirieron un total de 7 líneas de refracción de longitud variable entre 360 y 1080 m, de las cuales se obtuvieron velocidades de ondas de corte (Vs) para la roca equivalente. Con base en la información geotécnica obtenida de 14 sondeos realizados en la zona y las velocidades de ondas de corte (Vs) determinadas mediante el modelado sísmico se definieron dos perfiles geotécnicos tipo como modelos de entrada para el modelado dinámico. Se analizaron los espectros de respuesta de los dos perfiles tipo en la superficie, para sismos cercanos y sismos lejanos comparando la respuesta con los espectros elásticos normativos S2 y S3. Finalmente, se pudo concluir que la población de Cariaco puede zonificarse globalmente según los resultados obtenidos como un perfil S2, de acuerdo con la Norma Covenin 1756-2001, para sismos cercanos y sismos lejanos hasta 1,2 s de período fundamental. Para períodos mayores, los valores de aceleración del espectro de respuesta son mayores y superan al perfil S2.

Palabras clave: Cariaco, Refracción sísmica, Microzonificación sísmica, Geotecnia, Análisis dinámico.

DYNAMIC CHARACTERIZATION OF GEOTECHNICAL PROFILES IN CARIACO (EASTERN VENEZUELA), BASED ON SEISMIC REFRACTION DATA

ABSTRACT

The town of Cariaco in northeastern Venezuela, located close to the El Pilar Fault, suffered severe damage during the 1997 Cariaco earthquake. After the earthquake, geotechnical evaluations of the soil, and seismic refraction measurements were carried out. A total of 7 seismic lines with variable lengths between 360 and 1080 m were measured, obtaining the S-wave velocity structure of Cariaco with the velocity of the rock equivalent. Based on the geotechnical information obtained from 14 drillings in the area and the S-wave velocity profiles from the seismic profiling, two geotechnical type profiles were defined as input information for the dynamic modeling. The response spectra of both profile types were analyzed at the surface for near and distant earthquakes, comparing the derived response spectra with the normative elastic spectra S2 and S3. It is concluded from the modeling results that for near earthquakes and for distant earthquakes up to a fundamental period of 1.2 s, the town of Cariaco can be characterized globally as an S2 profile in accordance with the COVENIN 1756-2001 seismic code. For high periods, the acceleration values of the response spectra are greater than the S2 profile.

Keywords: Cariaco, Seismic refraction, Seismic microzoning, Geotechnics, Dynamic analysis.

INTRODUCCIÓN

Venezuela ha sido afectada gravemente por terremotos destructivos durante su historia (Grases, 1990) y muy

particularmente el Oriente Venezolano (Grases, 1990; Grases *et al.* 1999; Audemard, 1999, 2007), tal como lo evidenció el sismo ocurrido el 09 de julio de 1997, en el Estado Sucre, que afectó especialmente a la población de Cariaco, donde

ocurrieron los mayores daños y pérdidas de vidas (FUNVISIS *et al.* 1997; Bonilla, *et al.* 2000; Pérez, 1998; Mendoza, 2000; Baumbach *et al.* 2004; González *et al.* 2004). En la zona de estudio, el accidente geológico estructural más importante lo constituye la Falla de El Pilar. Esta falla es del tipo transcurrente dextral y de dirección este-oeste; se extiende desde la fosa de Cariaco y continúa hacia el sur-este hasta la falla Los Bajos (Beltrán *et al.* 1996).

La Falla de El Pilar forma parte de un sistema de fallas mayores que cruzan la parte norte de Sudamérica y que incluye las fallas de San Sebastián, Oca-Ancón y Boconó (Schubert, 1977; Audemard *et al.* 2000). La actividad sísmica somera de la región oriental de Venezuela (figura 1) está directamente asociada con la Falla de El Pilar (e.g. Schubert, 1982; Baumbach *et al.* 2004; Sobiesiak *et al.* 2005), lo que refleja el movimiento relativo de las placas del Caribe y de Sudamérica (e.g. Pérez *et al.* 2001; Weber *et al.* 2001). Es muy importante señalar que esta actividad ocurre a una profundidad hipocentral entre 0 y 20 km en la corteza (e.g. Baumbach *et al.* 2004), por lo que se le considera superficial, pudiendo ocasionar daños importantes a la infraestructura existente si ocurriesen sismos de magnitud moderada o alta. La sismicidad más profunda (a profundidades mayores a 60

km) se relaciona con los movimientos de subducción al este de las Antillas Menores (Molnar y Sykes, 1969; Pérez y Aggarwal, 1981; Russo *et al.* 1993; Sobiesiak *et al.* 2005).

El daño resultante de los terremotos está influenciado de diferentes formas por las características geotécnicas del área afectada. Las condiciones del suelo son realmente determinantes en los casos de amplificación, debido a la relación entre las características de los movimientos telúricos y las propiedades dinámicas de los depósitos de suelo. La respuesta dinámica de un depósito depende de las características del perfil geotécnico y de la sismicidad de la zona donde está ubicado, lo cual define los efectos locales (e.g. Seed, 1969; Whitman, 1972). La influencia de los efectos locales fue el factor determinante en el nivel de daños y colapsos ocurridos durante los terremotos de Niigata 1964, (Kawakami y Asada, 1966) y Alaska 1964 (Committee on the Alaska Earthquake, 1973), Caracas 1967 (Seed y Idriss, 1970; FUNVISIS, 1978), México 1985 (Seed *et al.* 1987, 1989) y Kobe 1995 (Iwata *et al.* 1999).

Para el análisis dinámico del suelo se han hecho numerosos estudios, donde se toman como base resultados de estudios geofísicos, como por ejemplo, en Bélgica y en los Alpes

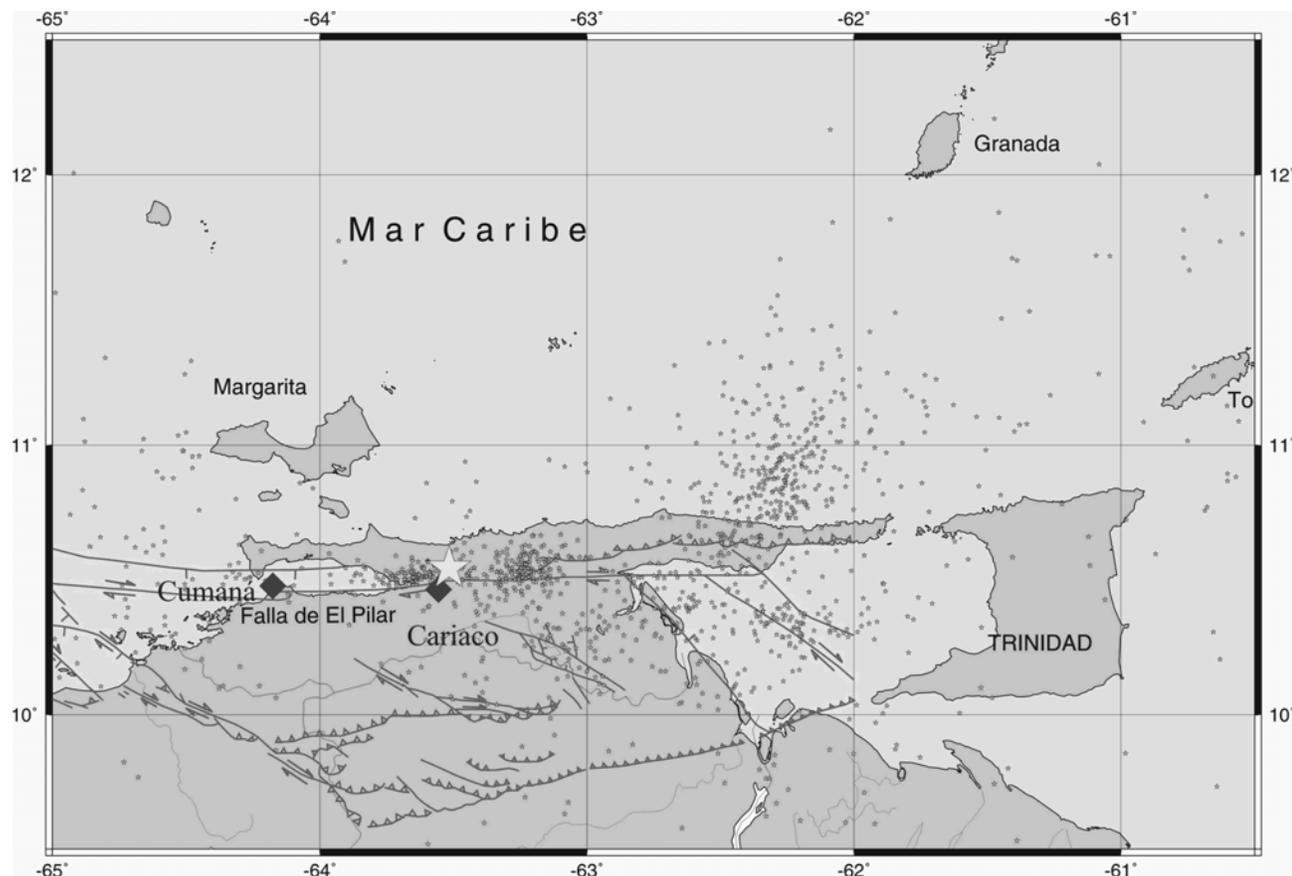


Figura 1. Mapa de las fallas activas y de sismicidad al del oriente de Venezuela (Audemard *et al.* 2000; Rendón *et al.* 2002). La estrella indica el epicentro del terremoto de Cariaco de 1997 (FUNVISIS, 1997).

(e.g. Jongmans y Campillo, 1993; Jongmans y Demanet, 1993) y en México (Lermo y Chávez-García, 1993a 1994b; Chávez-García *et al.* 1994). En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de caracterización desde el punto de vista sísmico-geotécnico con base en el análisis dinámico y propagación de ondas, aplicado a la región de Cariaco en el estado Sucre. Mediante este procedimiento se obtiene la distribución de las velocidades de ondas de corte (V_s) en función de la profundidad a través de la aplicación del método de refracción sísmica. Con estos datos se realizó un estudio donde se proponen modelos unidimensionales de cada uno de los perfiles estudiados para evaluar la respuesta dinámica de la zona.

SÍSMICA DE REFRACCIÓN (TRABAJOS DE CAMPO)

Se realizaron siete líneas sísmicas alrededor y dentro de la población de Cariaco, Estado Sucre (figura 2), tomando en cuenta las condiciones de espacio disponible. Las líneas varían entre 360 y 1080 metros de longitud, con separación entre geófonos de 10 metros, para todas las líneas. Como fuente de energía se utilizó explosivo (Pentolita), utilizando cargas que variaron entre 100 y 400 g, enterradas bajo el suelo a unos 80 cm de profundidad (tabla 1). Para el registro se utilizó un sísmógrafo Geometrics StrataView de 24 canales con geófonos verticales de 28 Hz. Los datos sísmicos completos están documentados en González (2002).

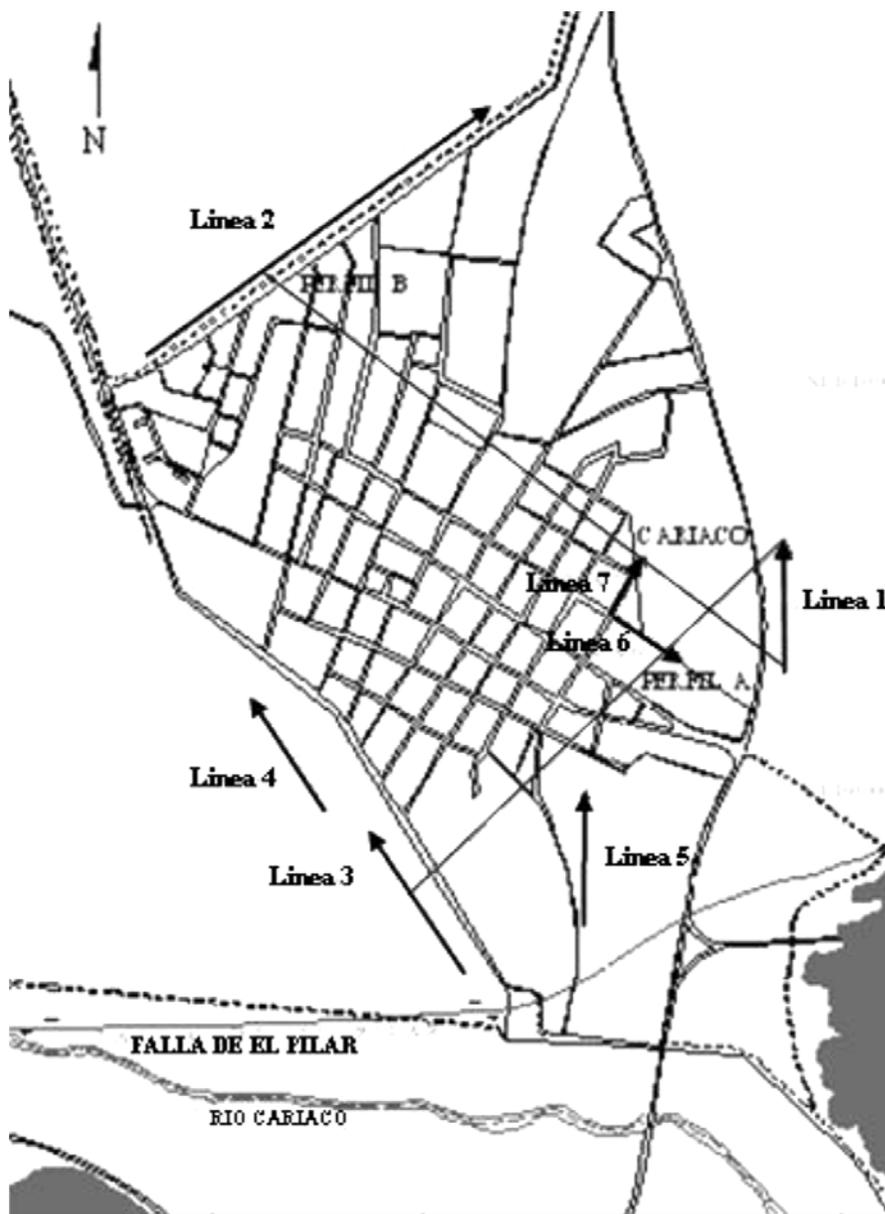


Figura 2. Mapa de ubicación de líneas sísmicas (la flecha indica hacia donde avanza el perfil) y de los perfiles compuestos A y B. Ubicación de la Falla El Pilar según Audemard *et al.* (2000).

Tabla 1. Parámetros de adquisición de las mediciones sísmicas de refracción.

	Orientación	Carga (g)	Energía	Longitud (m)	Distancia entre Geófonos (m)	Número de trazas	Incremento de tiempo (ms)	Sitio del disparo (m)
Línea 1	Sur-Norte	100-300	P/S	580	10	24	0,25	P/S: 0, 40, 190, 230, 290, 340, 510, 580
Línea 2	Suroeste-Noreste	100-300	S	1080	10			S: 0, 120, 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960, 1080
Línea 3	Sureste-Noroeste	100-400	P/S	480	10			P/S: 0, 120, 240, 360, 480
Línea 4	Sureste-Noroeste	100-300	P/S	300	10			P/S: 0, 32, 152, 272, 306
Línea 5	Sur-Norte	100-300	S	480	10			S: 0, 120, 240, 360, 480
Línea 6	Noroeste-Sureste	100-300	S	400	10			S: 0, 77, 197, 317, 394
Línea 7	Suroeste-Noreste	100-300	P/S	360	10			P/S: 0, 60, 180, 360

PROCESAMIENTO

El procesamiento de los datos se realizó con el programa REFRA (Sandmeier, 1998), el cual permite graficar las trazas sísmicas y asignar un valor de tiempo a las primeras (ondas P) y segundas (ondas S) llegadas para cada traza de los respectivos disparos.

Finalmente y luego de haber construido los modelos 1D, para cada uno de los disparos de la línea, se utilizó el programa RAYAMP (Crossley, com. pers.), mediante el cual se construyeron los modelos bidimensionales y se determinaron las velocidades de propagación de cada estrato mediante el método de trazado de rayos (figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de las ondas P fue dificultado por la presencia de estratos saturados de agua a partir de los 5 a 10 m de profundidad, debajo de lo cual se observaron velocidades sísmicas entre 1700 y 1900 m/s. No se observaron estratos con velocidades de ondas P mayores, quedando limitada la resolución en profundidad, partiendo de las observaciones de las ondas P. En las observaciones de las ondas S, se pueden identificar varios estratos hasta unos 100 m de profundidad. Con la información obtenida de los modelos bidimensionales de ondas S elaborados para cada línea

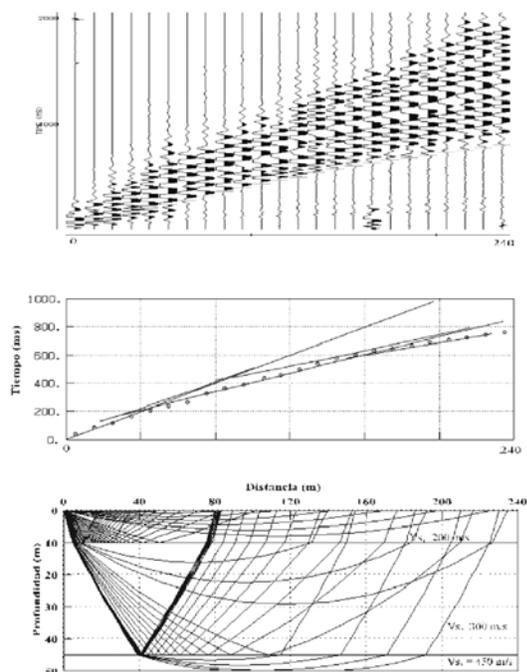


Figura 3. Ejemplo de una sección sísmica de la línea 2, con los tiempos de llegada de las ondas S (líneas grises, arriba), la dromocrónica con las llegadas observadas (círculos) y calculadas (líneas) (centro) y el modelo de velocidades de ondas de corte y el trazado de rayos (abajo).

sísmica (tabla 2), se construyeron dos perfiles compuestos para Cariaco (figuras 2 y 4). El perfil «A», de una longitud de unos 1000 m, se generó en dirección SO a NE con la información obtenida de los modelos de ondas S de las líneas 3, 5, 6 y 1, donde se observan cuatro capas. La capa más superficial, con un espesor entre 10 y 15 m a lo largo de todo el perfil, tiene una velocidad (V_s) que varía entre 200 y 250 m/s. La segunda capa, cuya base se ubica entre 25 y 30 m de profundidad, tiene una velocidad (V_s) entre 280 y 350 m/s. La tercera capa cuya base está a 80 m de profundidad,

disminuyendo su espesor hasta los 60 m hacia NE, muestra una velocidad (V_s) que varía entre 430 y 500 m/s. La capa más profunda se observa a partir de los 80 metros de profundidad al SO, con 60 metros hacia el NE, con una velocidad (V_s) que aumenta de 680 m/s a 750 m/s hacia el NE (figura 4).

Tabla 2. Velocidades de ondas P y S obtenidas mediante sísmica de refracción.

Resumen de velocidades obtenidas mediante refracción			
	PROFUNDIDAD (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
LÍNEA 1	0 - 8/14	1040	200
	8/14 - 32/40	1740	280
	32/40 - 60/90	1740	430
	60/90 -	2500	700
LÍNEA 2	0 - 10	500	200/250
	10 - 45/53	1750	300
	45/53 -	-	450
LÍNEA 3	0 - 8	700	250
	8 - 32	1900	300
	32 - 80	2250	500
	80 -	-	750
LÍNEA 4	0 - 7/10	800	200
	7/10 - 35/38	1730	320
	35/38 -	-	440
LÍNEA 5	0 - 4/12	700	200
	4/12 - 30/60	1800	320/350
	30/60 -	-	450/500
LÍNEA 6	0 - 4	600	150
	4 - 12	600	250
	12 - 40	1700	300
	40 - 90	-	450
	90	-	680
LÍNEA 7	0 - 10	700	200
	10 - 45	1700	300
	45 -	-	420

El perfil «B», de una longitud de unos 1500 m, se generó en dirección NO a SE con la información de los modelos de ondas S de las líneas 2, 7 y 1, donde se observan cuatro capas. La capa más superficial tiene un espesor entre 8 y 10 m a lo largo de todo el perfil, con velocidades (V_s) entre 200 y 250 m/s. La segunda capa, cuya base se ubica a 50 m de profundidad, disminuyendo a 30 m de profundidad en el extremo NE, tiene una velocidad de 300 m/s. Sigue una tercera capa con velocidad (V_s) de 450 m/s. Debajo, se logra identificar una cuarta capa a partir de los 90 metros de profundidad sólo al SE del perfil, con una velocidad (V_s) de 680 m/s (figura 4). De acuerdo a estos resultados de velocidades de ondas de corte promedios entre 250 - 450 m/s hasta unos 90 m de profundidad permiten clasificar los suelos como duros o densos, es decir perfiles S2 y S3 según el Capítulo 5 de la Norma venezolana «Edificaciones Sismorresistentes» (COVENIN, 2001).

Cálculo de la respuesta dinámica

Con las velocidades de ondas de corte (V_s) de los perfiles típicos obtenidos para este estudio y la información geotécnica obtenida de varias perforaciones realizadas en la población de Cariaco, publicada por Gámez *et al.* (1999), se construyeron dos modelos de perfiles geotécnicos asociados a los perfiles compuestos A y B. El perfil Tipo A abarca la estructura típica del perfil compuesto A (figura 4a) con 30 m de espesor de material con velocidades menores a 400 m/s y material con velocidades menores a 500 m/s hasta 90 m de profundidad (tabla 3). El perfil tipo B abarca la estructura típica del perfil compuesto B (figura 4b) con 50 m de espesor de material con velocidades menores a 400 m/s y material con velocidades menores a 500 m/s hasta 90 m de profundidad (tabla 4).

En función del potencial sismogénico del segmento de la Falla El Pilar en consideración (Audemard, *et al.* 2000), así como de los sismos históricos asociados a esa falla (Grases, 1990; Audemard, 1999 y 2007) y del sismo de 1997, se seleccionaron acelerogramas en roca o suelo duro correspondientes a sismos de magnitudes entre 6,1 y 7,3 del «PEER Strong Motion Database». Estos acelerogramas se agruparon según su distancia a la ruptura para analizar la respuesta dinámica de los perfiles tipos A y B. Para distancias entre 6 y 15 km se clasificaron como sismos cercanos y para distancias entre 15 y 60 km se les denominó sismos lejanos

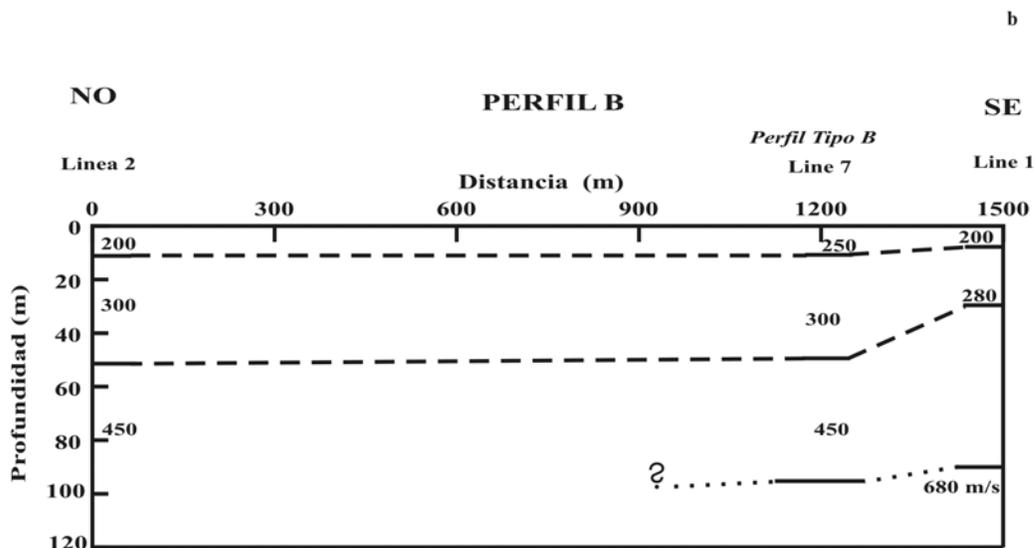
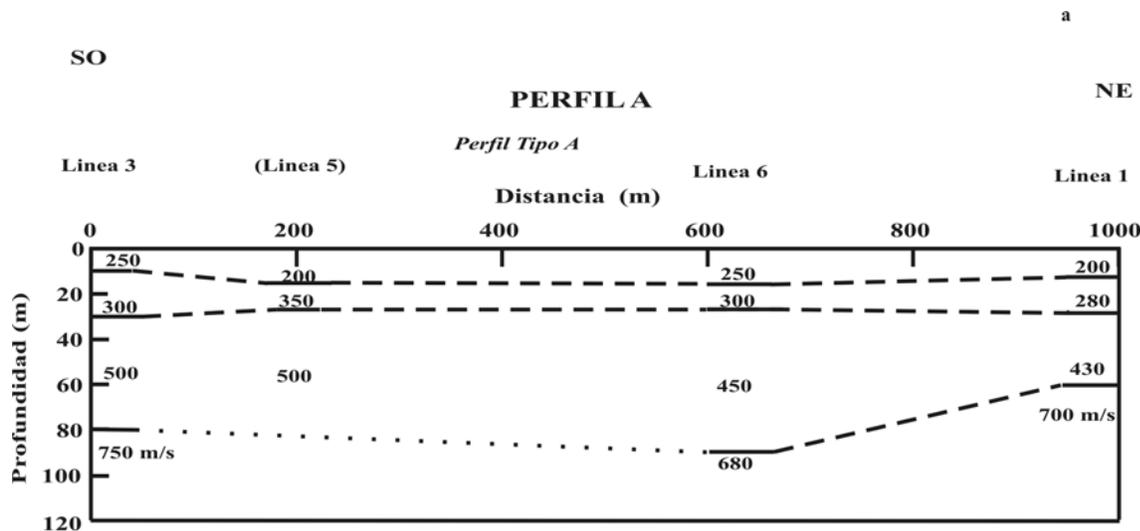


Figura 4. Perfiles compuestos con los respectivos modelos de velocidades de onda de corte de las líneas 3, 5, 6 y 1 (a) en dirección SO-NE y de las líneas 2, 7 y 1 (b) en dirección NO-SE (para su ubicación ver figura 2).

(González, 2002), siempre teniendo presente que estos sismos son locales. Utilizando el programa ProShake (Versión 1.1) se realizó el cálculo de la respuesta dinámica de los perfiles típicos. Este programa se basa en la solución continua de la ecuación de onda, adaptada para su uso con los movimientos temporales a través del algoritmo de la transformada rápida de Fourier. La no linealidad del módulo de corte y del amortiguamiento se toma en cuenta mediante el uso de propiedades lineales equivalentes (Seed e Idriss, 1970) a través de un procedimiento iterativo mediante el cual se obtienen valores del módulo de corte y de amortiguamiento compatibles con las deformaciones efectivas de cada estrato.

Al analizar los espectros de respuesta de los dos perfiles tipo en la superficie, se muestran para sismos cercanos (6-15 km de distancia) dos valores de período notables: un

máximo alrededor de 0,60 s con aceleraciones máximas superiores a 800 cm/s^2 en A y 600 cm/s^2 en B. Al contrastar estos resultados con el espectro elástico normativo del perfil S2, se observa la meseta en 936 cm/s^2 para periodos entre 0,18 y 0,70 s, donde el espectro normativo supera al espectro promedio y a los valores máximos en superficie (figura 5). Esto indica que el espectro normativo vigente es conservador para el modelo estudiado. Existe igualmente un segundo máximo alrededor de 1,5 s con aceleraciones que superan los 800 cm/s^2 en A y 600 cm/s^2 en B, ambos ubicados por encima de los espectros normativos. También se muestra el espectro normativo elástico S3 y se observa sólo en el caso tipo A que algunos valores de aceleración máxima en superficie superan ligeramente el espectro normativo S3. En este caso el espectro normativo vigente subestima ligeramente la respuesta del modelo considerado.

Tabla 3. Parámetros de entrada para el modelado dinámico mediante ProShake, estimados con base en la información geotécnica (Gámez *et al.* 1999) y de los perfiles sísmicos (figura 4) para el perfil tipo A.

PERFIL TIPO A - Nivel freático: 5 m; número de estratos: 12							
Estrato	Material	Espesor (m)	Peso Unitario (pcf)	Gmax (ksf)	Vs (m/s)	Curva de Módulo de Corte	Curva de Amortiguamiento
1	Arcilla (CL) IP=16	5,00	99,88	1336,66	250,00	Arcilla IP=10-20	Arcilla
2	Arcilla (CL) IP=20	5,00	99,88	1336,66	250,00	Arcilla IP=20-40	Arcilla
3	Arcilla (CL) IP=30	5,00	106,1	3195,48	300,00	Arcilla IP=20-40	Arcilla
4	Arena (SG)	5,00	106,1	3195,48	300,00	Arena	Arena
5	Arena (SG)	10,00	106,1	3195,48	300,00	Arena	Arena
6		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
7		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
8		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
9		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
10		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
11		10,00	112,37	8661,59	480,00	Arena	Arena
12	ROCA EQUIVALENTE	Infinito	118,61	18348,65	680,00	Roca	Roca

Tabla 4. Parámetros de entrada para el modelado dinámico mediante ProShake, estimados con base en la información geotécnica (Gámez *et al.* 1999) y de los perfiles sísmicos (figura 4) para el perfil tipo B.

PERFIL TIPO B - Nivel freático: 5 m; número de estratos: 12							
Estrato	Material	Espesor (m)	Peso Unitario (pcf)	Gmax (ksf)	Vs (m/s)	Curva de Módulo de Corte	Curva de Amortiguamiento
1	Arcilla (CL) IP=20	5,00	99,88	1336,66	250,00	Arcilla IP=10-20	Arcilla
2	Arcilla (CL) IP=20	5,00	99,88	1336,66	250,00	Arcilla IP=10-20	Arcilla
3	Arcilla (CL) IP=20	5,00	106,13	3195,48	300,00	Arcilla IP=10-20	Arcilla
4	Arena (SM)	5,00	106,13	3195,48	300,00	Arena	Arena
5	Arena (SM)	10,00	106,13	3195,48	300,00	Arena	Arena
6		10,00	106,13	3195,48	300,00	Arena	Arena
7		10,00	106,13	3383,44	300,00	Arena	Arena
8		10,00	112,37	7612,73	450,00	Arena	Arena
9		10,00	112,37	7612,73	450,00	Arena	Arena
10		10,00	112,37	7612,73	450,00	Arena	Arena
11		10,00	112,37	7612,73	450,00	Arena	Arena
12	ROCA EQUIVALENTE	Infinito	118,61	18348,65	680,00	Roca	Roca

Espectros de aceleración -Sismos cercanos (6 a 15 Km)

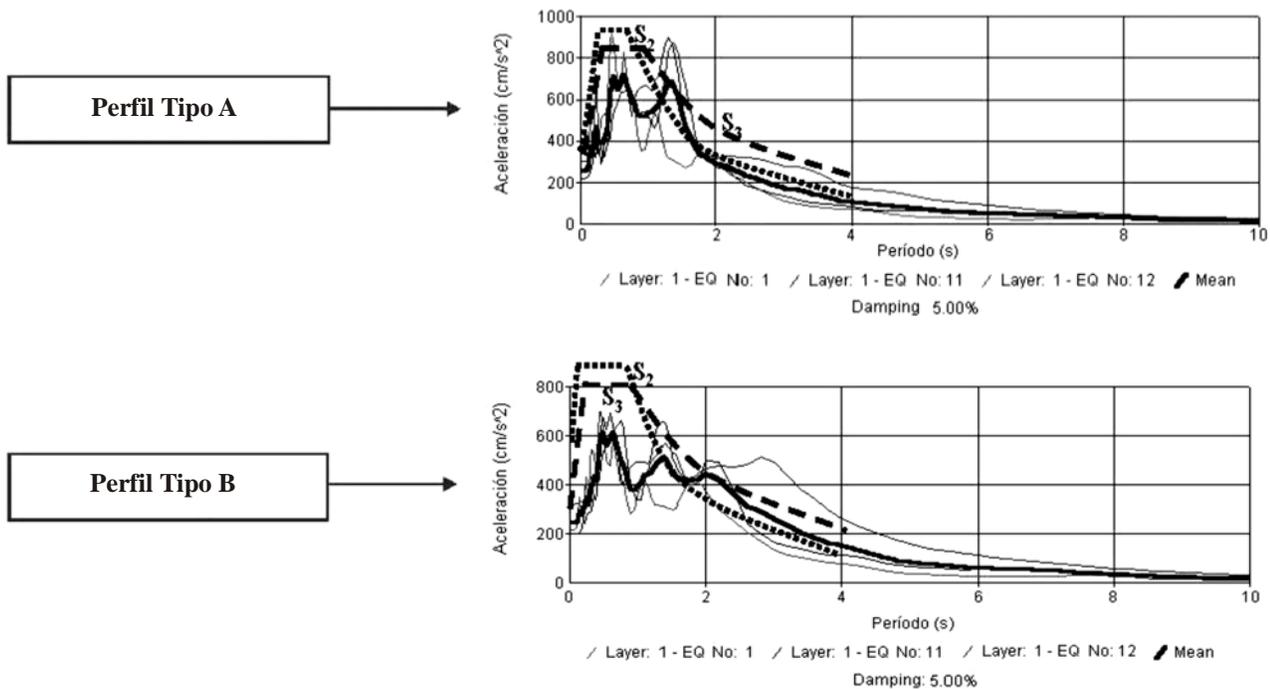


Figura 5. Espectros de respuesta de los perfiles tipo A y B en la capa superficial (layer 1), para sismos cercanos: eq3 = Superstition Hill, 1987, M = 6.6, d= 24.4 km, N-S; eq4 = Superstition Hill, 1987, M = 6.6, d= 24.4 km, E-W; eq6 = Imperial Valley, 1979, M = 6.9, d= 54.1 km, N-S; eq7 = Imperial Valley, 1979, M = 6.9, d= 54.1 km, E-W (detalles en González, 2002). La línea punteada corresponde a la forma espectral tipificada S2, la línea discontinua corresponde a la forma espectral tipificada S3 (COVENIN, 2001), la línea negra es el promedio de los cuatro sismos.

Los resultados de estos modelos señalan la pertinencia de construir en la población de Cariaco, edificaciones rígidas, tomando en cuenta las condiciones dinámicas y geotécnicas del lugar.

Al observar conjuntamente los espectros de respuesta en la superficie de los dos perfiles tipo para sismos lejanos (15 y 60 km de distancia) se muestran igualmente dos valores de período notables: un primer máximo alrededor de 0,20 s con aceleraciones que oscilan entre 500 cm/s² y 800 cm/s², y un segundo máximo alrededor de 2 s con aceleraciones que superan los 400 cm/s² en A y los 800 cm/s² en B. El espectro promedio obtenido muestra aceleraciones superiores a 400 cm/s² en ambos perfiles. Al comparar estos resultados con el espectro elástico normativo del perfil S2, se observa que estos valores de aceleración no superan al espectro promedio y los valores máximos en superficie, excepto para períodos superiores a 1,80 s (figura 6).

Adicionalmente al análisis de los sismos cercanos, los resultados del modelado dinámico de los sismos lejanos

señalan que los espectros normativos son conservadores, sin embargo no es recomendable construir en la población de Cariaco edificaciones flexibles.

CONCLUSIONES

En la población de Cariaco se logró determinar, a través del método de refracción sísmica, la presencia de sedimentos no consolidados hasta una profundidad de entre 80 y 90 metros en dirección SO – NE para el perfil «A». En la dirección NO – SE, para el perfil «B», los resultados son bastante similares ya que también se observó la presencia de sedimentos hasta los 90 metros de profundidad hacia el SE, la cual aumentó ligeramente hacia el NO (figura 4). La velocidad de ondas de corte (Vs), determinada para la roca equivalente, es de 680 m/s hacia el SE, aumentando hacia los extremos NE y SO hasta valores de 700 m/s y 750 m/s, respectivamente. Se puede considerar que a partir de los 90 metros de profundidad se tiene un material cuyas propiedades mecánicas son similares a las de la roca sedimentaria. Se observaron grandes espesores de

Espectros de aceleración -Sismos lejanos (15 a 54 Km)

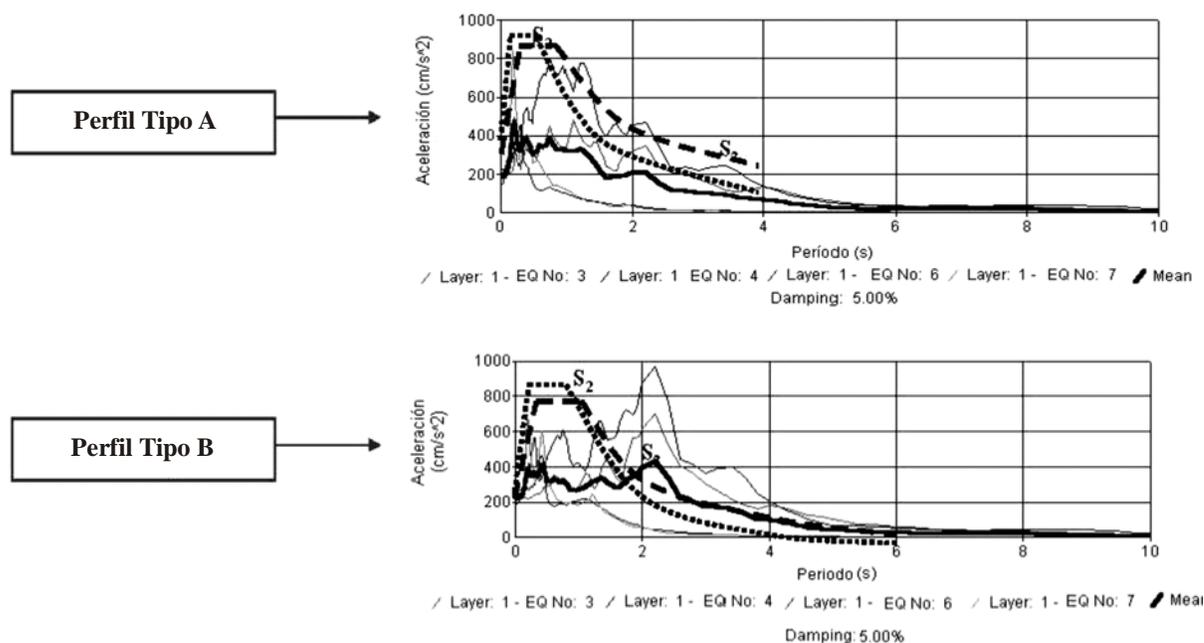


Figura 6. Espectros de respuesta de los perfiles tipo A y B en la capa superficial (layer 1), para sismos lejanos: eq1 = Imperial Valley, 1979, M = 6.9, d= 10.6 km; eq11 = Imperial Valley, 1979, M = 6.9, d= 7.6 km, N-S; eq12 = Imperial Valley, 1979, M = 6.9, d= 7.6 km, E-W (detalles en González, 2002). La línea punteada corresponde a la forma espectral tipificada S2, la línea discontinua corresponde a la forma espectral tipificada S3 (COVENIN, 2001), la línea negra es el promedio de los tres sismos.

sedimentos saturados, con velocidad de onda P entre 1700 y 1900 m/s. El nivel freático se ubicó en los primeros 5 a 10 m de profundidad. Las velocidades de ondas de corte (Vs) obtenidas aproximadamente hasta los 90 m de profundidad, permitieron clasificar los sedimentos como suelos duros o densos con velocidades promedio entre 250 – 450 m/s según la clasificación de la Norma de Edificaciones sismorresistentes (COVENIN, 2001).

La población de Cariaco puede zonificarse globalmente, según los resultados obtenidos como un perfil S2, de acuerdo con la Norma Covenin 1756-2001, Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN, 2001) para sismos cercanos y sismos lejanos hasta 1,2 s de período fundamental (más allá de 1,2 s los valores obtenidos en superficie exceden los valores normativos), por lo cual se debe evitar la construcción de estructuras flexibles con períodos superiores a 1,20 s.

En este estudio se evidencia la importancia de caracterizar apropiadamente los perfiles geotécnicos, con propiedades representativas de su comportamiento dinámico, compatibles con los niveles de deformación desarrollados.

Es necesario determinar la velocidad de onda de corte (Vs), como parámetro esencial para evaluar el comportamiento dinámico de perfiles geotécnicos de acuerdo a lo dispuesto en la Norma Covenin 1756-2001 (COVENIN, 2001). La metodología aquí sugerida para la determinación de las propiedades representativas de la respuesta dinámica de perfiles geotécnicos, (que deben incluir también ensayos de laboratorio), a través de mediciones sísmicas, es una opción válida para este tipo de estudios, considerando que es una metodología fácil de implementar y a bajo costo. La misma permite la mejor comprensión del comportamiento dinámico. Esto hace posible evaluar de manera más acertada los efectos de interacción suelo - estructura y reducir las incertidumbres asociadas a la utilización de curvas típicas para diferentes materiales y las correlaciones basadas en parámetros estáticos.

AGRADECIMIENTOS

Las mediciones sísmicas han sido posibles gracias al préstamo del equipo de registro por la Freie Universität Berlin (FUB) - P. Wigger y S. Lüth. Los estudios han sido apoyados económicamente por PDVSA (fondos especiales para la

investigación del sismo de Cariaco). H. Duque, G. Malavé, J. Alvarrellos (INTEVEP), A. Pernía y N. Reyes (FUNVISIS) participaron en las mediciones sísmicas, CAVIM realizó el manejo del explosivo. Los acelerogramas usados en este estudio provienen del PEER Strong Motion Database (Universidad de California). Queremos agradecer las observaciones de dos revisores anónimos.

REFERENCIAS

- AUDEMARD, F. A. (2007). *Revised seismic history of the El Pilar fault, Northeastern Venezuela, from the Cariaco 1997 earthquake and recent preliminary paleoseismic results*. Journal of Seismology, DOI 10.1007/s10950-007-9054-2.
- AUDEMARD, F., MACHETTE, M., COX, J., HART, R., HALLER, K. (2000). *Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions*. U.S. Geological Survey Open-File-Report 00-18, 79 + map.
- AUDEMARD, F. A. (1999). *Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar, Venezuela nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos*. VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica. Mérida, Venezuela. (en CD-Rom).
- BELTRÁN, C., SINGER, A., RODRÍGUEZ, J. (1996). *The El Pilar Fault active trace (Northeastern Venezuela) neotectonic evidence and paleoseismic data 3rd Int. Symp. of Andean Geodynamics*, Saint-Malo, France, Résumés Étendus, 153-156.
- BAUMBACH, M., GROSSER, H., ROMERO, G., ROJAS, J., SOBIESIAK, M., WELLE, W. (2004). *Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake*. Tectonophysics, 379(1-4), 1-23.
- BONILLA, R., LÓPEZ, O. A., CASTILLA, E., TORRES, R., MARINILLI, A., ANNICCHIARICO, W., GARCES, F., MALDONADO, Z. (2000). *El Terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997*. Boletín Técnico del IMME, 38 (2), 1-50.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F., LERMO, J., CUENCA, J., CÁRDENAS, M. (1994). *Microzonificación Sísmica de la ciudad de Puebla, Report to the Mexican Council of Science and Technology (CONACyT)*, México, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- COMMITTEE ON THE ALASKA EARTHQUAKE. (1973). *The Great Alaska earthquake 1964*, Engineering, Geology, and Summary Volumes, National Academy of Sciences, (Committee on the Alaska Earthquake of the Div. of Earth Sciences, National Research Council).
- COVENIN. (2001). *Edificaciones Sismo-resistentes. Norma Venezolana COVENIN 1756:2001*. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas, Articulado, 124 pp.
- CROSSLEY, D., COM. PERS. McGill University, Montreal RAYAMP – Programa para el trazado de rayos.
- FUNVISIS, IMME-UCV, UDO, ACV, CAV, CI-SUCRE. (1997). *The July 9, 1997, Cariaco, Eastern Venezuela Earthquake*. EERI-Newsletter, Vol. 31 (10), EERI Special Earthquake Report, 1-8.
- FUNVISIS, (1978). *Segunda Fase del Estudio del Sismo ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967*. Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, FUNVISIS, Caracas, Venezuela, Volumen A, pp. 517.
- GÁMEZ, M; HERNÁNDEZ, R; DE SANTIS, F. (1999). *Elaboración de un mapa de índice de daños durante el sismo ocurrido en Cariaco, Edo. Sucre, el 9 de Julio de 1997*. VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida, 12-14 de Mayo de 1999, CD, 9.
- GONZÁLEZ, J. (2002). *Microzonificación sismogeotécnica con base en el análisis dinámico y propagación de ondas: aplicación en la región de Cariaco, Edo. Sucre*. Trabajo Especial de Grado, MSc. Ing. Estructural, Fac. Ingeniería-UCV, inédito, 145 pp.
- GONZÁLEZ, J., SCHMITZ, M., AUDEMARD, F., MASAKI, K., CONTRERAS, R., MOCQUET, A., DELGADO, J., DE SANTIS, F. (2004). *Site and induced effects associated with the 1997 Cariaco earthquake*. Engineering Geology, 72 (1-2), 143-177.
- GRASES, J., ALTEZ, R., LUGO, M. (1999). *Catálogo de sismos sentidos o destructores Venezuela 1530/1998*, Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- GRASES, J. (1990). *Terremotos Destructores del Caribe 1502-1990. Una contribución al Decenio Internacional para la reducción de desastres naturales*. UNESCO-RELACIS.
- IWATA, T., SEKIGUCHI, H., IRIKURA, K., KAWASE, H., MATSUSHIMA, S. (1999). *Strong motion data and geological structures distributed for simultaneous simulation for Kobe*. In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H. and Sasatani, T. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study, Volume 3, Balkema, Rotterdam, 1295-1310.

- JONGMANS, D., CAMPILLO, M. (1993). *The determination of soil attenuation by geophysical prospecting and the validity of measured Q values for numerical simulations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 12, 149-157.
- JONGMANS, D., DEMANET, D. (1993). *The importance of surface waves in vibration study and the use of Raleigh waves for estimating the dynamic characteristics of soils*. Engineering Geology, 34, 105-113.
- KAWAKAMI, F., ASADA, A. (1966). *Damage to the ground and earth structure by the Niigata earthquake of June 16, 1964*. Soil and Foundation, Vol. VI, No. 1.
- LERMO, J., CHÁVEZ-GARCÍA, F. J. (1993a). *Site effect evaluation using spectral ratios with only one station*. Bull. Seis. Soc. Am., 83, 1574-1594.
- LERMO, J., CHÁVEZ-GARCÍA, F. J. (1994b). *Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 13, 413-423.
- MENDOZA, C. (2000). *Rupture history of the 1997 Cariaco, Venezuela, earthquake from teleseismic P waves*. Geophys. Res. Lett., 27, 1555-1558.
- MOLNAR, P., SYKES, L. (1969). *Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity*. Geol. Soc. Am. Bull., 80, 1639-1684.
- PÉREZ, O. (1998). *Seismological report on the Mw=6.8 strong shock of 9 July 1997 in Cariaco, Northeastern Venezuela*. Bull. Seis. Soc. Am., 88, 874-879.
- PÉREZ, O. J., AGGARWAL, Y. (1981). *Present-day tectonics of the southeastern Caribbean and Northeastern Venezuela*. J. Geophys. Res., 86, 10791-10804.
- PÉREZ, O. J., BILHAM, R., BENDICK, R., VELANDIA, J. R., HERNÁNDEZ, N., MONCAYO, C., HOYER, M., KOZUCH, M., (2001). *Velocity field across the southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean / South American plate motion using GPS geodesy 1994-2000*. Geophys. Res. Lett., 28, 2987-2990.
- RENDÓN, H., ROMERO, G., ACEVEDO, R., NIEVES, L., ORIHUELA, N. (2002). *Mapa de sismicidad instrumental con sismos de magnitud conocida en el período 1910-2002*. FUNVISIS.
- RUSSO, R. M., SPEED, R. C., OKAL, E. A., SHEPARD, J. B., ROWLEY, K. C. (1993). *Seismicity and tectonics of the southeastern Caribbean*. J. Geophys. Res., 98, 14299-14319.
- SANDMEIER, K. J. (1998). *REFRA – Program for processing and interpretation of refraction seismic data*, Karlsruhe, Germany 168 pp.
- SCHUBERT, C. (1977). *La zona de la falla del Pilar*. Boletín Técnico IMME, 57-58, 11-17.
- SCHUBERT, C. (1982). *Origin of Cariaco Basin, Southern Caribbean Sea*. Marine Geology 47, 345-360.
- SEED, H. B. (1969). *Influence of de Local Soil Conditions on Earthquake Damage*. Septima Conferencia de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Oakland.
- SEED, H. B., IDRIS, I. M. (1970). *Soil Moduli and damping factors for dynamic response analysis*. EERC-Report 70-10, Berkeley, California.
- SEED, H. B., ROMO, M. P., SUN, J. I., JAIME, A., LYSMER, J. (1987). *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the Earthquake of September 19, 1985*, Rpt. No. UCB/EERC-87/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SEED, H.B., SUN, J. H. (1989). *Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California*, Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SOBIESIAK, M., ALVARADO, L., VÁZQUEZ, R. (2005). *Recent Seismicity in Northeastern Venezuela and Tectonic Implications*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., 20 (4), 75-84
- WEBER, J. C., DIXON, T. H., DEMETS, C., AMBEH, W.B., JANSMA, P., MATTIOLLI, G., SALEH, J., SELLA, G., BILHAM, R., PÉREZ, O. (2001). *GPS estimate of relative plate motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela*. Geology, 29, 75-78.
- WHITMAN, R. V. (1972). *Effect of de Soil Conditions Upon Earthquake Ground Motions. Chapter 12*, Fundamentals of Earthquake Engineering for Buildings. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.