

Investigaciones sísmicas de escala micro y macro en Cariaco

Leonardo Alvarado¹, Jorge González¹, Michael Schmitz¹ y Stefan Lüth²

1) FUNVISIS – Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, www.funvisis.org.ve

2) FUB – Freie Universität Berlin, Alemania, stefan@geophysik.fu-berlin.de

Resumen

Durante el sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1997, Cariaco y zonas aledañas sufrieron considerablemente más daños que Casanay, ubicado cerca del borde oriental de la cuenca sedimentaria de Cariaco. En julio de 1998 se registraron 5 perfiles sísmicos de 10-20 Km de longitud cruzando la cuenca sedimentaria, con el fin de determinar el espesor de los sedimentos, tres de ellos a lo largo de la cuenca y dos perpendiculares al eje principal, de esta manera se alcanzó la roca metamórfica y sedimentaria al norte y al sur. Para las mediciones se usaron 13 equipos digitales de tres componentes y detonaciones de entre 7 y 26 Kg de explosivos c/u. Alrededor de Cariaco el espesor de los sedimentos Cuaternarios alcanza 1.3 Km con velocidades sísmicas entre 1.9 y 2.1 Km/s y velocidades del basamento mayores a 4 Km/s. Hacia la zona de Casanay en el este el espesor de los sedimentos disminuye a 0.8 Km. La variación en el espesor de los sedimentos Cuaternarios no consolidados y saturados de agua de la cuenca sedimentaria de Cariaco es considerado un factor importante que controla la distribución de los daños ocasionados por este sismo. Para estudios detallados, se realizaron un total de 7 perfiles sísmicos con distancias entre disparos (explosivos) y receptores de hasta 500 m en la ciudad de Cariaco. Se registraron las primeras llegadas de buena calidad hasta el final de las secciones. La saturación con agua de los sedimentos arenosos a 3-5 m de profundidad impidió que se pudieran identificar interfases más profundas de las ondas P. En las ondas S, se obtuvo una interfaz indicando sedimentos consolidados entre 60 y 100 m de profundidad al sur de Cariaco, cercano al borde de la cuenca. El espesor de sedimentos con velocidades de onda S menores de 700 m/s supera 100 m en el resto de la ciudad. Para analizar de forma preliminar la respuesta dinámica a lo largo de los perfiles sísmicos usamos un registro en sitio de roca a 10.6 Km del epicentro de un sismo de magnitud 6.9 de California como señal. Los períodos obtenidos varían entre 0.85 y 1.05 s con una respuesta de aceleración entre 0.4 y 0.8 g. El alto porcentaje de daños en Cariaco podría atribuirse a la existencia y el espesor de sedimentos blandos y, en casos particulares hacia el límite suroeste, a fenómenos de licuación de suelos.

Abstract

During the July 9, 1997 Cariaco earthquake, the town of Cariaco and surrounding villages suffered considerably more damage than Casanay, located close to the eastern end of Cariaco sedimentary basin. A net of 5 seismic refraction profiles crossing the Cariaco valley was done in July 1998 for determination of the thickness of the Quaternary sediments. Profile lengths varied between 10 and 20 km, three of them within strike of the valley and two crossing perpendicular to the valley axis into the northern and southern, Mesozoic metamorphic and sedimentary bedrocks. 13 digital three component stations were used for recordings of detonations using between 7 and 26 kg of explosives each. Close to Cariaco, more than 1.3 km thick Quaternary sediments with seismic velocities ranging between 1.9 and 2.1 km/s and bedrock velocities of more than 4 km/s were observed. Thickness of Quaternary sediments decreases eastwards to about 0.8 km at Casanay. The variation in thickness of the unconsolidated, water saturated Quaternary sediments of the Cariaco sedimentary basin is considered an important factor controlling the damage pattern of the Cariaco earthquake. For detailed studies, a seismic refraction survey was performed along 7 lines with a maximum receiver offset of 500 m and explosive charges as energy source in the town of Cariaco. First arrivals were observed to the end of the profiles with good data quality. The saturation with water of the sandy sediments at 3-5 m depth masked deeper interfaces in the P-waves. In the S-waves, an interface indicating consolidated sediments, was obtained at 60 to 100 m in depth south of Cariaco, close to the basin edge. Thickness of soft sediments below 700 m/s S-wave velocity exceeds 100 m in Cariaco. For preliminary dynamic response analysis along the seismic profiles, we used a record of a magnitude 6.9 California earthquake recorded on rock site at an epicentral distance of 10.6 km as input signal. The derived periods range between 0.85 and 1.05 s with a maximum acceleration response varying between 0.4 and 0.8 g. The high percentage of damage in the center of Cariaco can be attributed to the presence and thickness of the soft soils in that area and in some particular cases towards the southwest of the town to liquefaction phenomena.

Introducción

La zona de estudio forma parte del límite entre las placas del Caribe y de Sudamerica con un movimiento relativo entre ellos de 1-2 cm/a (e.g. Minster and Jordan, 1978). Un sistema de fallas transversas, levantado en detalle en la zona de estudio (Beltrán et al., 1996), identifica la expresión en superficie con un desplazamiento de 40-125 Km en el Neógeno tardío (Erlich and Barrett, 1990). Los estudios detallados indican la prolongación de la falla de El Pilar hacia la falla Los Bajos al sureste y no hacia la isla de Trinidad al este. El sismo de Cariaco del 9 de julio de 1997 con una magnitud de $M_s=6,8$ (FUNVISIS et al., 1997) se localizó sobre un segmento de la falla de El Pilar en la cuenca sedimentaria de Cariaco (figura 1), que divide la roca metamórfica Mesozoica de la península Araya-Paria en el norte (e.g. Vignali, 1979) de la roca sedimentaria Cretácica de la Serranía del Interior al sur (e.g. Metz, 1968).

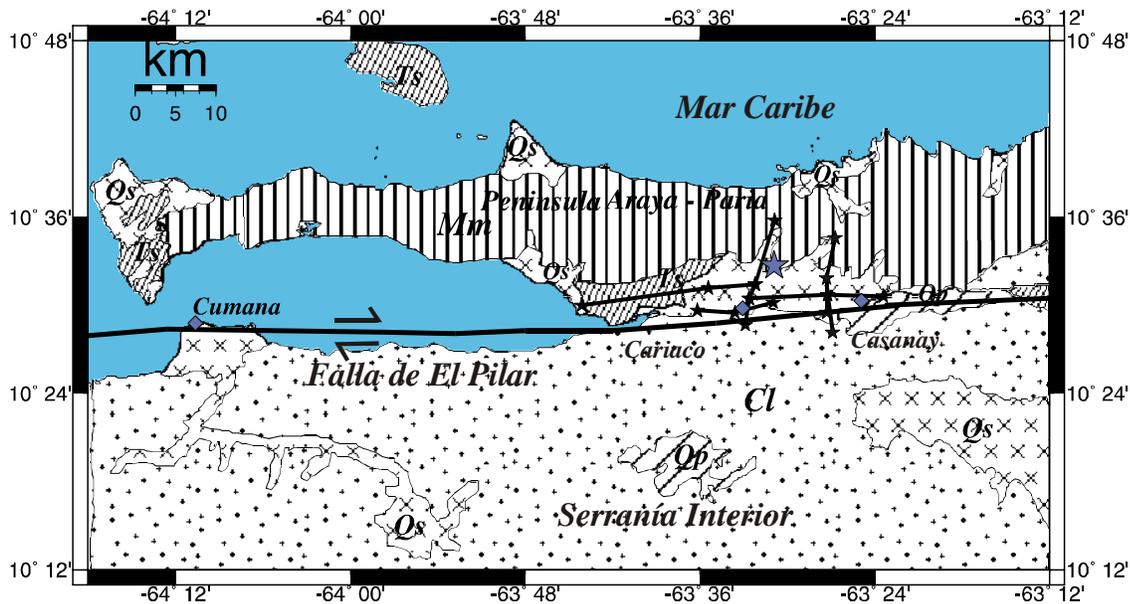


Figura 1. Mapa geológico, simplificado según Bellizzia et al., (1976), con la localización de la falla de El Pilar según Audemard et al., (2000). Los lugares de los disparos están indicados por estrellas pequeñas, los perfiles sísmicos por líneas (detalles ver Alvarado, 2001); la estrella grande indica el epicentro del sismo de Cariaco (Funvisis et al., 1997). Mm = roca metamórfica Mesozoica de la península Araya-Paria, Cl = caliza Cretasica de la Serranía del Interior, Ts = sedimentos Terciarios, Qr = sedimentos Cuaternarios (reciente), Qp = sedimentos Cuaternarios (Pleistoceno).

La falla de El Pilar cruza las poblaciones de Cariaco y Casanay, pero los daños en los edificios se concentraron en Cariaco, mientras Casanay, que está ubicado en el límite oriental de la cuenca sedimentaria, sufrió mucho menos daños, estando a una distancia al epicentro parecida a la de Cariaco. Daños importantes fueron registrados hasta Cumaná, 70 Km al oeste del epicentro. La sedimentación de la cuenca empezó en el Pleistoceno con sedimentos terrestres, siendo conglomerados, arenas y arcillas sin consolidación las facies predominantes (Vierbuchen, 1984). Consideramos, que el aumento en espesor de los sedimentos Cuaternarios saturados hacia el Golfo de Cariaco al oeste es responsable por el aumento de daños en esta dirección.

Esta contribución reporta los resultados de las mediciones sísmicas tanto en la cuenca sedimentaria como en la ciudad de Cariaco. El análisis de mediciones de ruido ambiental aportará datos sobre el período fundamental de vibración del suelo.

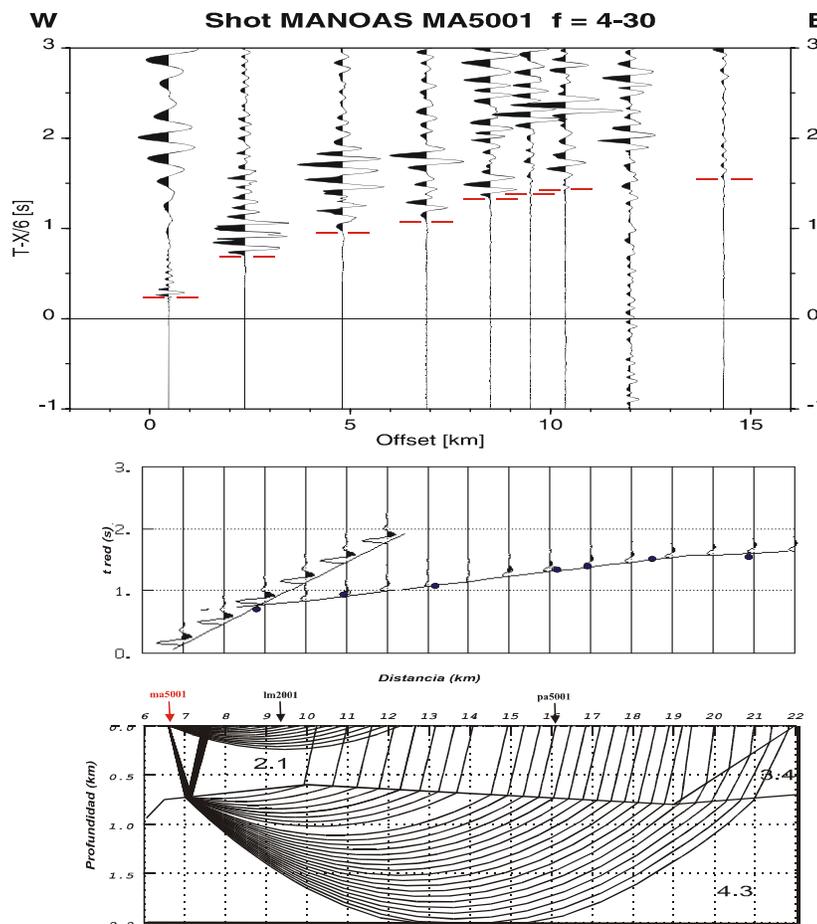
Sísmica cuenca sedimentaria de Cariaco

Mediciones

El experimento sísmico de refracción se llevó a cabo durante la primera semana de julio de 1998. Participaron 8 personas distribuidas en cuatro grupos, tres para la instalación de los equipos y uno para registro de tiempo. Las mediciones se realizaron a lo largo de 4 perfiles de longitud variable, entre 10 y 20 Km, ubicados entre las poblaciones de Guacarapo y Casanay; tres de los perfiles tienen dirección este – oeste paralelos al eje de la cuenca, mientras que los dos perfiles restantes tienen dirección norte – sur, perpendiculares al eje (figura 1). En cada perfil se realizaron entre tres y cinco voladuras con cargas de explosivos que variaban entre 7 y 26 Kg colocadas a una profundidad de entre 5 y 12 m (detalle ver Alvarado, 2001).

Para recoger las señales se emplearon 13 sismógrafos portátiles con sismómetro MARK- 3D de tres componentes y de frecuencia natural de 1 Hz, equipados con receptores GPS y reloj interno de alta precisión, 11 de ellos del tipo PDAS-100 y 2 del tipo ORION. Además la ubicación de los equipos de registro se hizo en el momento de su instalación, a través de GPS externo. Las distancias relativas entre receptores se controlaron mediante los tacómetros de los carros, se estimaron errores resultantes en la localización, menores a 50 m. Las señales sísmicas fueron digitalizadas con una frecuencia de 100 Hz y revisadas en campo usando el programa PDIS (Grunewald, com. pers., 1994), luego se almacenaron en disquetes ZIP.

Para la construcción de las secciones sísmicas se utilizó el programa Seismic Unix (Cohen J., Stockwell J.). Las secciones sísmicas se presentan en tiempo reducido con una velocidad de reducción de 6 Km/s. Se aplicaron filtros pasabanda con un rango de frecuencias entre 6 y 30 Hz. En todas las secciones sísmicas se identificaron las fases correspondientes a la primera llegada de la onda P.



83

Figura 2. Sección sísmica del disparo Manoas (Ma5001) hacia el este (arriba) con los tiempos de llegada observadas y calculadas (centro) y el modelo de velocidades con el trazado de rayos (abajo).

Interpretación (sísmica de la cuenca)

La fase de interpretación se realizó en dos etapas, la primera consistió en el análisis 1-D, para obtener funciones de velocidad – profundidad, en esta etapa se utilizó el programa GWBASIC el cual es un programa de inversión basado en la ecuaciones Wiechert – Herglotz (Giese, com. pers.). La segunda etapa fue la creación de modelos 2-D basados en los modelos 1-D, en esta etapa se utilizó el programa RAYAMP (Crossley, pers.com) el cual utiliza el método de trazado de rayos. Para el perfil Este –Oeste adicionalmente se utilizó el programa RAYINV (Zelt and Smith, 1992), el cual permite hacer una inversión para el cálculo del modelo 2-D

Perfil E - O

El perfil E - O de la cuenca sedimentaria está dividido en dos partes, una oriental y una occidental. La parte oriental del perfil presenta una velocidad de sedimentos que varía entre 1.9 Km/s hacia el este entre Campoma (Cm2002) y Cariaco (Cr2003), y desde Manoas (Ma5001, figura 2) hasta Guarapiche (Gp5002) velocidades de sedimentos de 2.1 Km/s. El espesor de los sedimentos alcanza los mayores valores de profundidad en 1.3 Km debajo la población de Cariaco y de 0.8 Km en la zona de Casanay; por debajo de estos sedimentos se tiene una capa con velocidad promedio de 4.3 Km/s. Los gráficos con los tiempos de llegada se muestran en la figura 3.

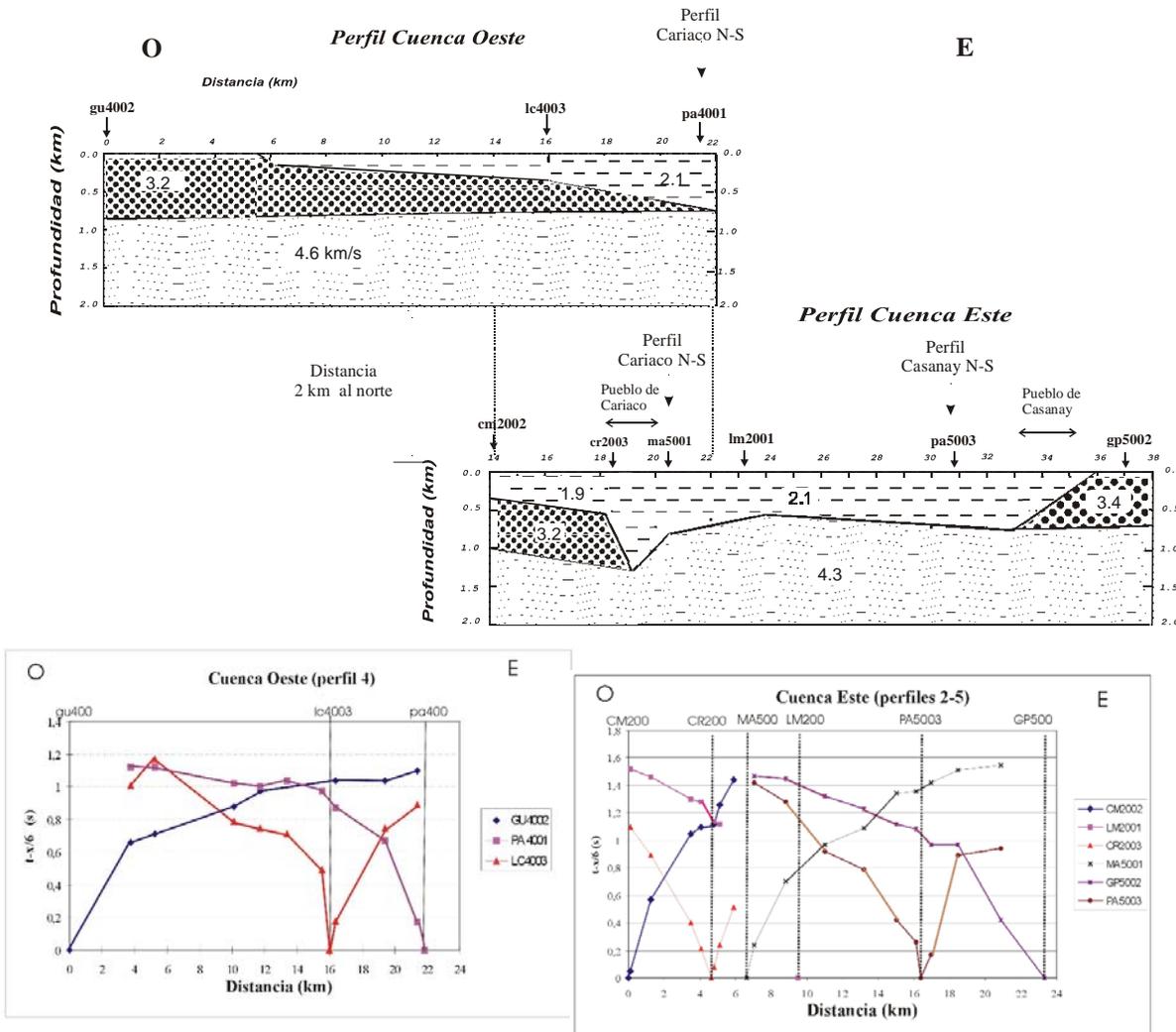


Figura 3. Tiempos de llegada a lo largo del perfil cuenca E-O (abajo) y modelos de velocidad obtenidos (arriba).

El perfil Cuenca Oeste está formado por tres estratos; el estrato más superficial tiene una velocidad promedio de 2.1 Km/s. Este estrato aparece a partir de 6 Km al este de Guarapiche (Gu4002) su espesor aumenta de 150 m hasta 720 m en la zona de Palosanal (Pa4001). El segundo estrato presenta una velocidad de 3.2 Km/s y disminuye su espesor hacia el este del perfil. El tercer estrato, cuyo tope se ubica a unos 0.8 Km de profundidad, tiene una velocidad de 4.6-4.7 Km/s.

Inversión

A lo largo del perfil E-O de la cuenca hay un total de 9 disparos registrados con un espaciamento irregular entre los receptores, por lo cual se eligió un proceso robusto de inversión (Zelt y Smith, 1992). Se parametrizan estratos definidos por nodos en profundidad y en velocidad a lo largo de los estratos con un intervalo de 2 Km en la primera interfaz y 4 Km en la segunda interfaz. Las llegadas son divididas en ondas directas y refractadas en las interfases, con gradientes constantes en los estratos. Se calcularon 10 pasos de inversión, mediante los cuales se redujo el residuum en los tiempos (RMS) de 314 ms del modelo 1-D inicial a 157 ms para el modelo final. La cobertura de rayos se concentra cercano a Cariaco, en el centro del modelo, donde el resultado es más confiable.

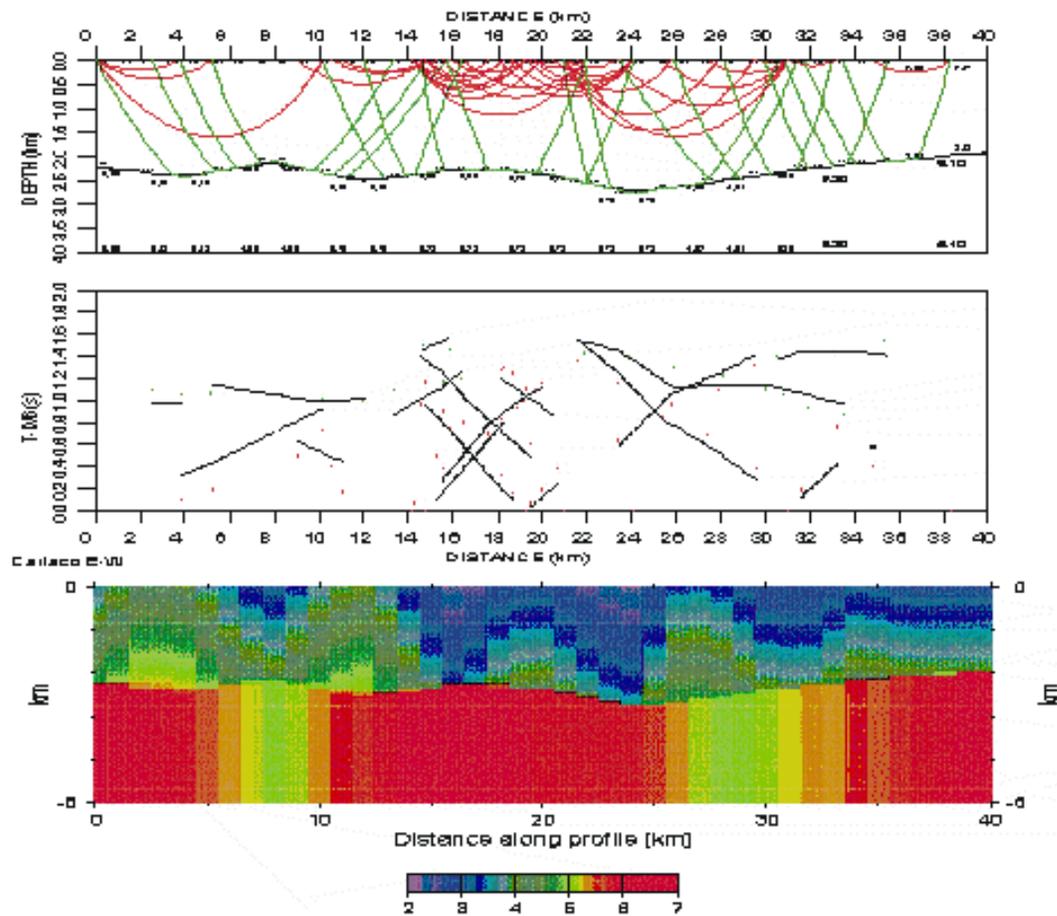


Figura 4. Modelo de inversión de tiempos de llegada a lo largo del perfil O-E (combinado) en la cuenca sedimentaria con la cobertura de rayos (arriba), los tiempos observados y calculados (centro) y el modelo de velocidades después de 10 iteraciones (abajo).

Velocidades sísmicas altas (3- 4 Km/s) dominan los primeros 14 Km del modelo en el oeste, seguidos por un rápido descenso de las velocidades a 2 - 3.5 Km/s para los primeros 2 Km de profundidad en el Km 25 del perfil. Hacia el este sigue un alto en las velocidades con 4 Km/s con una depresión entre los Km 29 y 34 con

3 Km/s hasta 1 Km de profundidad. La interfaz a los 2 Km de profundidad es un artefacto del modelo inicial (figura 4). Los resultados de la inversión muestran una buena coincidencia con el modelaje mediante el trazado de rayos (figura 3), con las altas velocidades en el oeste, bajas velocidades debajo de Cariaco y, con menor claridad, debajo Casanay y el alto de las velocidades entre los dos.

Perfil N - S Cariaco

El perfil Cariaco N-S muestra un retraso de los tiempos de llegada hacia el sur de Quebrada Honda (qh1002) lo que indica una disminución de la velocidad relacionada con el aumento del espesor de sedimentos. Hacia el Norte de la cuenca se obtuvieron velocidades de 4.6 Km/s correspondientes a la velocidades de las rocas Metamórficas; hacia el sur se tiene un aumento del espesor de sedimentos los cuales alcanzan una velocidad de 2.1 Km/s. La cuenca sedimentaria comienza a una distancia de 6 Km de Quebrada Honda y termina cerca de los 13 Km a partir de los cuales la llegadas comienza a adelantarse nuevamente, obteniéndose velocidades de 3.5 Km/s, esta zona esta ubicada en la población de Cordón Cariaco (cc7001) que a su vez esta caracterizada por rocas del Cretáceo. La profundidad alcanzada por la cuenca es alrededor de 0.8 Km (figura 5).

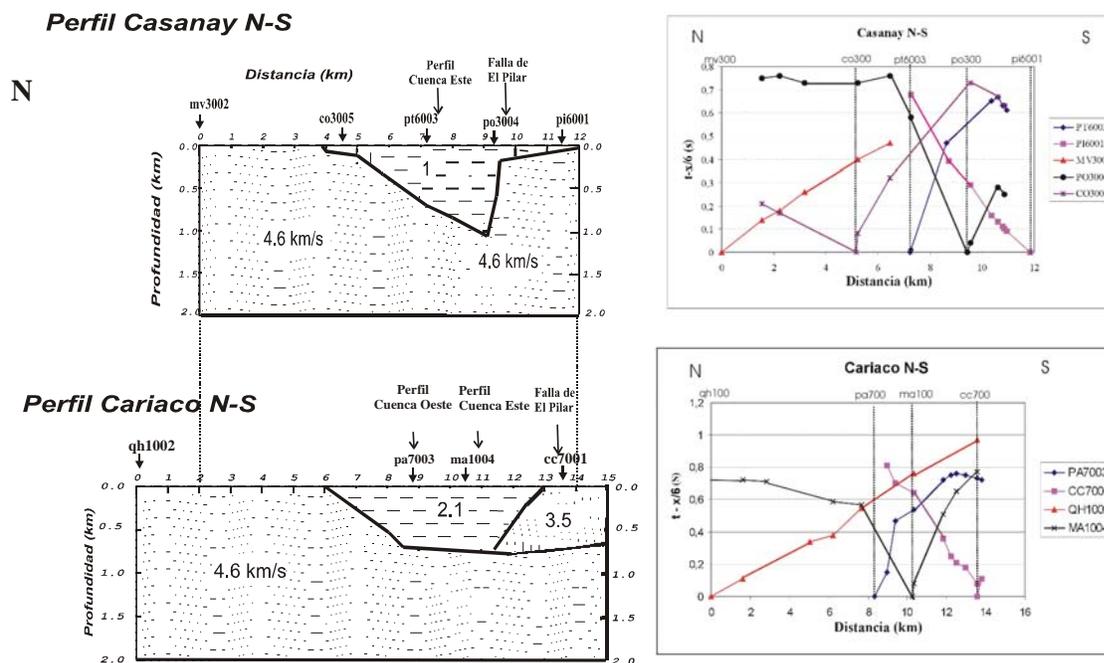


Figura 5. Tiempos de llegada a lo largo del perfil Casanay N-S (arriba) y Cariaco N-S (abajo) y los respectivos modelos de velocidad obtenidos.

Perfil N - S Casanay

El perfil N - S en Casanay tiene dos disparos sobre el basamento: La Maravilla (mv3002) y El Costo (co3005), la velocidad calculada en esta zona es de 4.6 Km/s para el basamento. Hacia el sur de El Costo se observa retraso en las llegadas lo que indica que se ha entrado a la zona de la cuenca, allí se tienen velocidades de sedimentos cuyos valores oscilan entre 2.1 y 2.3 Km/s, la profundidad alcanzada por la cuenca en esta zona es de 1 Km, muy cerca de Pueblo Pantoño (Po3004). Hacia el sur de Pueblo Pantoño las llegadas se hacen más tempranas y se obtienen velocidades de 4.6 Km/s para el basamento (figura 5).

Períodos fundamentales de vibración del suelo en Cariaco

Los períodos de vibración del suelo, obtenidos mediante mediciones de ruido ambiental, constituyen un parámetro importante para la caracterización del sitio. En Cariaco han sido realizadas mediciones de ruido ambiental en unos 60 sitios, usando un sismómetro Guralp 40-T (0.033 - 50 Hz) y un digitizador

Nanometrics Orion de 24 bits en mediciones de 5 minutos con una frecuencia de 100 Hz. Se aplicó la técnica de cálculo del período fundamental de vibración usando la razón entre los espectros horizontales y verticales (razón H/V), lo que se conoce de forma generalizada como técnica de Nakamura (1989).

Un primer paso en el procesamiento consiste en la conversión de los datos al formato ASCII para después imprimir las series de tiempo. Una ventana de tiempo de 30 s con bajo ruido es elegido para su posterior análisis. Se calcula del espectro de Fourier para cada componente y se comparan los espectros para las dos componentes horizontales para garantizar de que tienen formas similares y, en caso contrario, elegir una ventana alterna. Después, se calcula la media entre los dos valores y con este valor se calcula la razón H/V (figura 6a). No siempre resulta un pico claro en la razón H/V, lo que puede explicarse por un contraste bajo en las velocidades sísmicas de los estratos (Konno y Ohmachi, 1995) y la aparición de varios picos puede indicar la existencia de varias capas en el subsuelo, lo que dificulta la identificación del período predominante de vibración del suelo. Los períodos predominantes en Cariaco varían entre 0.5 y 1.1 s, observando los valores mas altos hacia el noroeste (figura 6b), sin que existieran zonas delimitadas con valores diferentes.

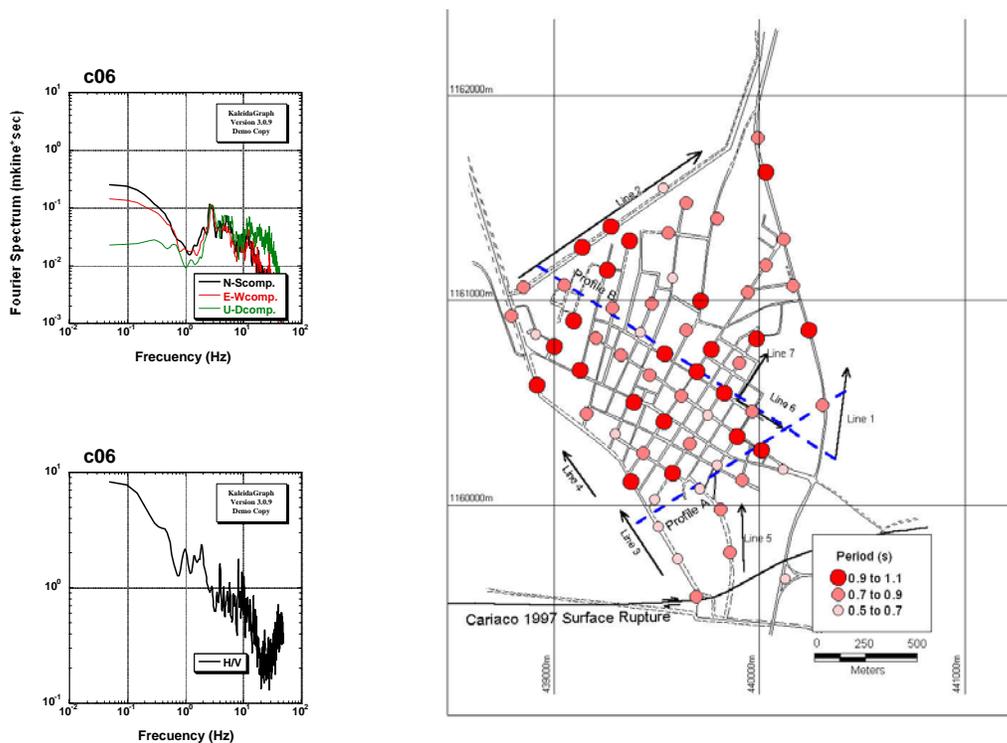


Figura 6. a) Izquierda: Análisis de Fourier (arriba) y la relación de la componente horizontal con la vertical (H/V) (debajo) para un ejemplo de registro de ruido ambiental. b) Derecha: Mapa con los valores del período fundamental de vibración del suelo obtenidos en cada punto. Se indica la ubicación de las líneas sísmicas de refracción y de los perfiles interpretativos (figura 7).

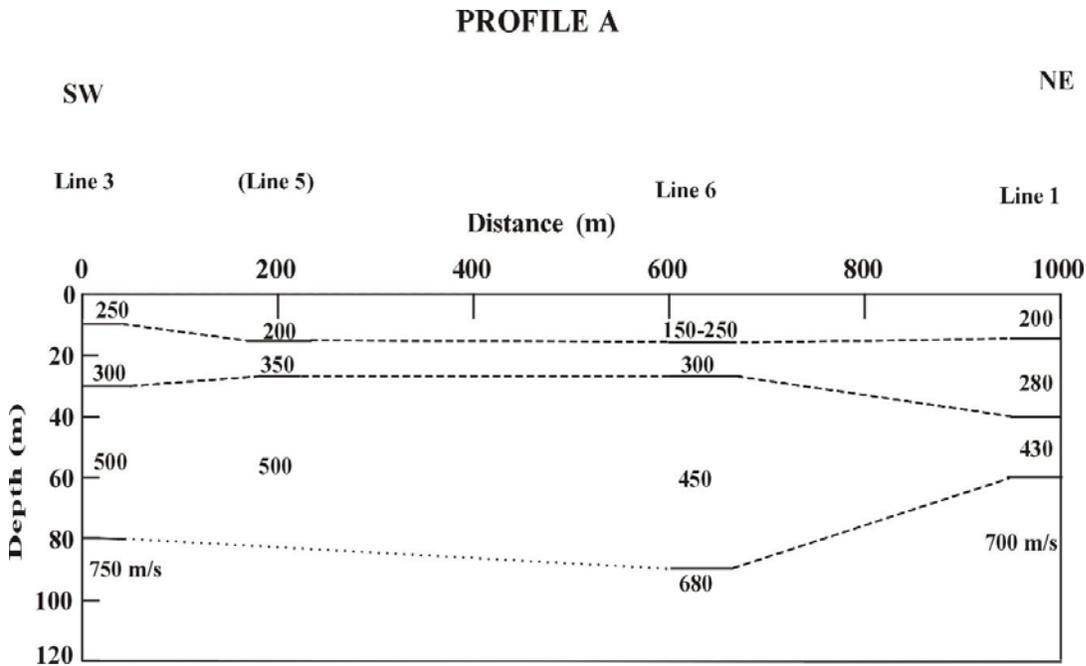
Mediciones sísmicas en Cariaco

Las velocidades de propagación de las ondas de corte en la parte superficial es uno de los parámetros geofísicos mas importantes para la caracterización y clasificación de un perfil de suelo y para la determinación de los niveles de aceleración a considerar en los diseños de una estructura. Por esta razón, en julio de 1998 se realizaron mediciones sísmicas de refracción en Cariaco para determinar el espesor de suelos blandos en la ciudad, que pueden causar amplificaciones fuertes. Un total de 7 líneas sísmicas hasta 1000 m de longitud y una máxima distancia fuente - receptor de 500 m con 5 m entre receptores. Se realizaron disparos en los dos extremos y en el centro de las líneas con cargas de pentolita entre 100 y 400 g a 0.5 - 1 m

de profundidad como fuente de energía. Los registros se efectuaron con un equipo Geometrics StrataView de 24 canales y geófonos de 14 Hz (verticales). Para el procesamiento el paquete REFRA seismic refraction software (Sandmeier, 1998) fue usado para la identificación de las primeras llegadas y la construcción de los modelos 1-D (intercept-time method), incluyendo el control de tiempos recíprocos. El modelaje 2-D fue realizado con el programa RAYAMP (Crossley, pers. Com.).

El análisis de las primeras llegadas de la onda P indica una variación del estrato superior con un espesor entre 4 y 10 m y velocidades sísmicas entre 500 y 1040 m, seguidos por un estrato con una velocidad entre 1.700 y 1900 m/s, lo que representa los sedimentos saturados de agua. Con las llegadas de las ondas P no se puede resolver la estratificación interna de los sedimentos blandos. Solo en los perfiles 1 y 3 se observan estratos con velocidades mayores a 2.000 m/s (González, 2001).

Las velocidades S para el estrato superior hasta una profundidad de unos 10 m varían entre 150 y 250 m/s. Debajo sigue un estrato con velocidades entre 280 y 350 m/s con un aumento en velocidad hasta 430 - 500 m/s. Sólo en la parte sur de Cariaco se puede observar un estrato con velocidades sísmicas entre 680 y 750 m/s entre 60 y 90 m de profundidad (figura 7). Este estrato es interpretado como el tope meteorizado de las calizas Cretácicas que afloran al sur del valle o relictos de los sedimentos Terciarios expuestos unos 5 Km mas hacia el oeste (ver resultados de la sísmica del valle de Cariaco). El estrato con velocidades entre 430 y 500 m/s podría interpretarse como arena gruesa y gravas depositados desde el sur e interpretamos los estratos superiores con velocidades sísmicas bajas como arenas finas intercaladas con arcillas. La ausencia del estrato más profundo en los registros en el norte de Cariaco indica una profundidad de los sedimentos Cuaternarios mayor a 90 m en esta zona.



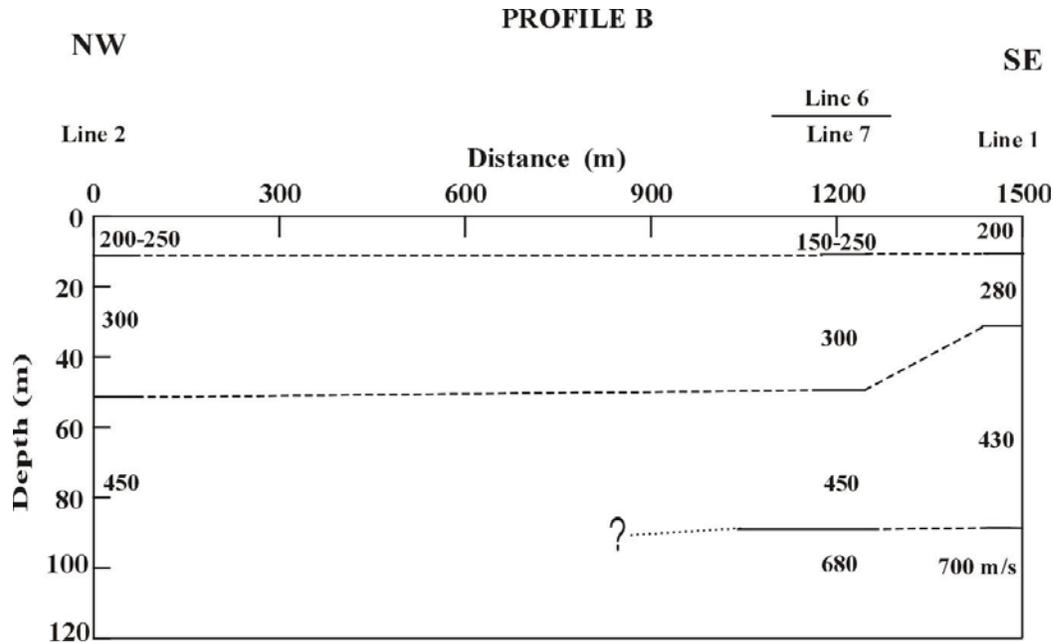


Figura 7. Perfiles interpretativos con los resultados de las mediciones sísmicas de refracción en Cariaco (ver figura 6b para su ubicación).

Caracterización dinámica

Utilizando las estructuras geotécnicas de los perfiles obtenidos mediante el método de refracción sísmica, se construyeron los modelos para obtener la respuesta dinámica de estos perfiles, utilizando para ello la componente horizontal del acelerograma del sismo de Imperial Valley de 1979 ($M=6.9$) a 10.6 Km de la ruptura en suelo no consolidado y cuyo mecanismo de ruptura de falla es similar al ocurrido en Cariaco en 1997. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 8, donde se observan los espectros de respuesta para los perfiles mencionados, y donde puede verse que la energía liberada hasta los 0.4 s es disipada por el terreno, a partir de 0.4 s se presenta una amplificación importante hasta aprox. 3 s, donde se obtienen valores de aceleración que superan 0.5 g. Los períodos obtenidos mediante el método de Nakamura (1989) son similares a los períodos de amplificación predominantes obtenidos de la respuesta dinámica. Sin embargo, los daños ocurridos durante el sismo de Cariaco de 1997 se atribuyen a la baja calidad de las construcciones, en su mayoría de cemento autoconstruidas y a la falta de mantenimiento de antiguas viviendas de bahareque, además de los valores importantes de aceleración ocurridos.

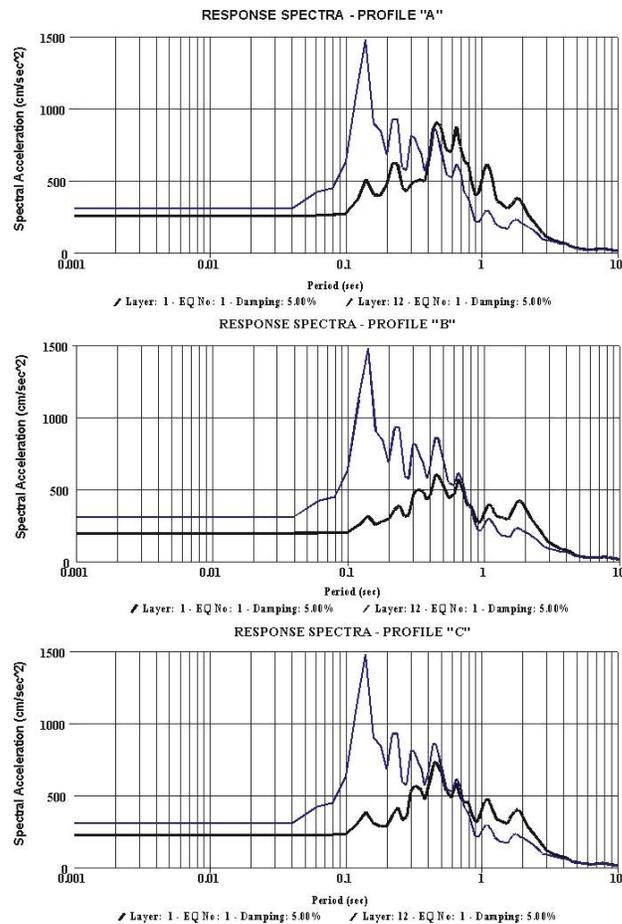


Figura 8. Espectros de respuesta (factor de amortiguación 5%) para 3 perfiles tipos en Cariaco (González, 2001): ubicación de perfiles a y b ver figura 6a; perfil c esta ubicado en el final nororiental de perfil a con menor espesor de los sedimentos Cuaternarios. Las líneas delgadas y gruesas corresponden a la base y al tope de los sedimentos, respectivamente. El acelerograma usado es el componente horizontal de un registro del sismo de 1979 del Imperial Valley (Ms 6.9) en sedimentos consolidados a 10.6 Km distancia a la ruptura de superficie, que tiene un mecanismo de ruptura similar al sismo de Cariaco de 1997.

Conclusiones

De los perfiles sísmicos de refracción se obtuvieron velocidades de sedimentos del Cuaternario que varían entre 1.9 y 2.3 Km/s. Hacia el oeste del perfil cuenca oeste se observa un estrato cuya velocidad es de 3.2 Km/s y el cual va disminuyendo de espesor hacia el este; esta capa se asocia con sedimentos del Terciario. El espesor de sedimentos va aumentando de oeste a este alcanzándose la mayor profundidad debajo de la población de Cariaco con 1.3 Km de profundidad, mientras que en Casanay los sedimentos alcanzan una profundidad de 0.8 m. Por debajo de la capa de sedimentos del Cuaternario y del Terciario se encuentra un estrato con velocidades que varían entre 4.3 y 4.6 Km/s.

En promedio, el 40% de todas las casas en Cariaco fueron fuertemente dañadas o destruidas durante el sismo de Cariaco de 1997, con un 60% de daño en el centro y solamente 20% de daño hacia el sureste, cercano al borde de la cuenca (Gómez et al., 1999). Sin embargo, no se puede establecer una relación directa entre los períodos predominantes, las velocidades sísmicas y la distribución de los daños, ya que muchas de las casas dañadas eran casas de bahareque en muy mal estado de conservación.

Agradecimientos

Este estudio fue parcialmente financiado por el proyecto CONICIT S1-97002996 y el plan de emergencia del sismo de Cariaco de PDVSA. Los trabajos de campo de la sísmica fueron posibles gracias a los 11

equipos sísmicos PDAS-100 y Geometrics de la Universidad Libre de Berlín (FUB) – gracias a P. Wigger. Agradecemos a R. Acevedo, H. Duque, C. Grimán, A. Montilla, A. Pernía, C. Ramos, N. Reyes y A. Sánchez su participación en los trabajos de campo, A. Mesa (PERFOMESA) y L. Pregitzer (CAVIM) y sus grupos por la preparación y realización de los disparos, A. Moreau (Cartografía Nacional) por aportar un vehículo. V. Rocabado participó en la medición e interpretación del ruido ambiental. D. Crossley de McGill Univ., Montreal, proporcionó el programa RAYAMP usado para el trazado de rayos. El programa GMT (Wessel and Smith, 1995) fue usado para la elaboración de muchas figuras.

Referencias

- Alvarado, L., 2001. Determinación de la geometría de la cuenca sedimentaria de Cariaco mediante el análisis de datos sísmicos de refracción. Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela, 118pp.
- Audemard, F. A., Machette, M., Cox, J., Hart, R. and 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 pp + map.
- Bellizzia, A. (coord.), Pimentel, N. and Bajo, R., 1976. Mapa Geológico Estructural de Venezuela, escala 1:500.000. Ediciones FONINVES, Caracas.
- Beltran, C., Singer, A. and Rodriguez, J.A., 1996. The El Pilar Fault active trace (northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. *Third ISAG*, St. Malo, pp. 153-156.
- Cohen, J., and Stockwell, J., 1994, The User's Manual Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Erlich, R.N. and Barrett, S.F., 1990. Cenozoic plate tectonic history of the northern Venezuela-Trinidad area. *Tectonics*, 9: 161-184.
- FUNVISIS, IMME-UCV, UDO, ACV, CAV and CI-Sucre, 1997. The July 9, 1997, Cariaco, Eastern Venezuela Earthquake. EERI-Newsletter, Vol. 31 (10), EERI Special Earthquake Report: 1-8.
- Gámez, M., Hernández, R. and 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, 9 pp.
- González, J., 2001. Caracterización sísmico-geotécnica basada en métodos geofísicos- caso de estudio la región de Cariaco, Estado Sucre. Tesis de maestría en Ingeniería Estructural, Universidad Central de Venezuela.
- Konno, K. and Ohmachi, T., 1998. Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *BSSA*, 88, 228-241.
- Metz, H.L., 1968. Stratigraphic and geologic history of extreme northeastern Serranía del Interior, State of Sucre, Venezuela. Fourth Caribbean Geological Conference, Port of Spain, Trinidad & Tobago, 1965, Transactions, 275 - 292.
- Minster, B. J. and Jordan, T.H., 1978. Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83: 5331-5354.
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *OR or RTRI*, 30, 1.
- Sandmeier, K.J., 1998. REFRA – Program for processing and interpretation of refraction seismic data, Version 2. Karlsruhe, Germany, 168 pp.
- Vierbuchen, R., 1984. The geology of the El Pilar fault zone and adjacent areas in northeastern Venezuela. In: W.E. Nonini, R.B. Hargraves and R. Shagam (eds.), *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*, GSA Memoir 162, 189-212.
- Vignali, M., 1979. Estratigrafía y estructura de las cordilleras metamórficas de Venezuela Oriental (Península de Araya - Paria e Isla de Margarita). *Escuela de Geología y Minería, UCV, Caracas, GEOS*, 25: 19-66.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1995. New version of the Generic Mapping Tool released. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 76: 329.
- Zelt, C.A. and Smith, R.B., 1992. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.*, 108, 16-34.