

# Mediciones sísmicas en torno al hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, estado Sucre

Marcos Romero<sup>1</sup>, Michael Schmitz<sup>1</sup>, F. Bonive<sup>2</sup>, Franck Audemard<sup>1</sup>,  
Jorge González<sup>1</sup>, Víctor Rocabado<sup>1</sup>, Jaime Avendaño<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FUNVISIS, Caracas, <sup>2</sup>Universidad de Oriente, Centro Sismológico, Cumaná

## Resumen

Se realizó el registro de un total de 5 líneas sísmica en los alrededores del hospital de Cumaná, en febrero del 2001, con el fin de definir las velocidades sísmicas para la caracterización dinámica del suelo alrededor del hospital, además se esperaba tener indicios para la ubicación de la traza activa de la Falla El Pilar. Igualmente se generó el modelo de velocidades generalizado para el análisis de los espectros de respuesta para sismos potenciales (1 Km., 10 Km. y 50 Km. de distancia de la ruptura). De los modelos obtenidos, el modelo de las ondas de corte del perfil "Pantalla" se presenta un levantamiento de las capas más profundas hacia la superficie en el sur del perfil, lo que podría asociarse a la presencia de la traza activa de la Falla El Pilar.

## Introducción

La ciudad de Cumaná está ubicada sobre sedimentos fluvio-deltaicos del río Manzanares y de la llanura costera (Beltrán & Rodríguez, 1995). La traza de la falla de El Pilar, la que separa las placas del Caribe y de Sudamérica, cruza la ciudad (Beltrán & Giraldo, 1989; Beltrán *et al.*, 1996). Por esta razón, Cumaná es una de las ciudades venezolanas más afectadas por los terremotos (Grases, 1990), lo cual está respaldado por su alta rata de sismicidad (Franke *et al.*, 1993). Las variaciones laterales en la sedimentación son muy marcadas con un gran número de meandros abandonados del río Manzanares en la llanura aluvial (Beltrán y Rodríguez, 1995), en la cual se intercalan arenas del cordón litoral, así como sedimentos de los conos de eyección provenientes de los cerros de Caigüire, constituidos por arcillas, arenas y gravas (Ascanio, 1972). Los Cerros de Caigüire, que se ubican entre las desembocaduras de los ríos Manzanares y Cautaro, son formados por una estructura transpresiva, localizada entre dos ramales de la Falla El Pilar, con sedimentos de las formaciones Caigüire y Cumaná (Ascanio, 1972) de edad Plio-Pleistocenos conformados principalmente por arenas y arcillas intercaladas con gravas y conglomerados. Los altos índices de daños ocurridos en Cumaná históricamente, se deben tanto a la alta sismicidad de la región (Audemard, 1999), como a la particularidad del subsuelo de la ciudad. Los resultados de mediciones de microtemores muestran una buena relación de la geología de superficie (Beltrán y Rodríguez, 1995) y los valores de período predominante de vibración y factores de amplificación (Abeki *et al.*, 1998) con las intensidades de daños ocasionados por el sismo de Cariaco del año 1997 (Lang *et al.*, 1999; 2002). El objetivo primordial de este estudio es obtener la estructura de las velocidades de onda de corte para la caracterización dinámica del suelo alrededor del hospital además de tener indicios para la ubicación de la traza activa de la Falla El Pilar. De los modelos obtenidos de la sísmica de refracción se generó el modelo de velocidades generalizado para el análisis de los espectros de respuesta para sismos potenciales a lo largo de la Falla de El Pilar. Se consideraran tres sismos, uno muy cercano (a 1 km de distancia sobre la ruptura), uno cercano (a 10 km de distancia sobre la ruptura) y uno lejano (a 54 km de distancia sobre la ruptura).

## Sísmica de refracción

**Adquisición.** Durante los días 10 y 11 del mes de febrero del 2001 se llevo a cabo la adquisición de los datos de sísmica de refracción en torno al Hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá de Cumaná, estado Sucre. Se realizó el registro de un total de 5 líneas sísmicas identificadas como: Hospital (Hp), Fundasalud (Fp), Pantalla (P), Club (C) y Liceo-Vertical (V) con longitudes variables entre 144 y 550 m (Fig. 1). Como fuente de energía para los registros se usaron cargas de pentolita y pólvora negra con peso variable entre 100 g y 500 g, las cuáles fueron colocadas en pozos de entre 1 y 3 m de profundidad. Los registros se efectuaron con un sismógrafo de 48 canales (Geometrics StrataView) y con geófonos horizontales y verticales de 28 y 30 Hz respectivamente.

**Procesamiento de los datos.** El procesamiento y modelado de los perfiles se realizó con el programa REFLEXW. Dicho programa permite graficar las trazas sísmicas y obtener primeras (ondas P) y segundas (ondas S) llegadas; efectuar el control de tiempos de llegada; posteriormente a este paso crear los modelos 1D para la obtener las velocidades y profundidades aparentes del medio para finalmente realizar el modelado 2D, mediante el trazado de rayos (ray tracing).

**Análisis de los datos sísmicos.** En los registros de las ondas P fue posible identificar una primera capa con velocidades sísmicas entre 300 y 500 m/s, que es interpretada como sedimentos blandos de la llanura aluvial con intercalaciones con arenas del cordón litoral y en partes relleno artificial. En la parte sur del perfil "Pantalla" estos valores aumentan a 580-680 m/s, lo que podría interpretarse como intercalaciones de arcillas, arenas y gravas de un cono de eyección de los Cerros de Caigüire. A una profundidad entre 4 y 6 m este estrato es seguido por velocidades entre 1750 y 2000 m/s, lo que corresponde a sedimentos saturados de agua. No fue posible identificar estratos más profundos en los registros de la onda P.

Los modelos de las ondas de corte están representados por tres capas. La capa más superficial tiene una velocidad sísmica entre 150 y 280 m/s, interpretado como sedimentos cuaternarios de la llanura aluvial. En la parte sur del perfil "Pantalla" las velocidades aumentan hasta 360 m/s (Fig. 2), lo que podría interpretarse como intercalaciones de arcillas, arenas y gravas próximos al cono de eyección de los Cerros de Caigüire, tal como fue observado en el modelo de las ondas P. La profundidad de esta primera capa varía entre 10 y 20 m. La segunda capa está representada por velocidades entre 300 y 500 m/s hasta una profundidad de 25 - 65 m, interpretados como sedimentos de la llanura aluvial o del cordón litoral. La última capa con velocidades de la onda de corte entre 460 y 700 m/s es interpretada como sedimentos Plio-Pleistocenos de las formaciones Caigüire y Cumaná, principalmente compuestos por arenas y arcillas intercaladas con gravas y conglomerados.

No se observan cambios laterales muy bruscos en los modelos sísmicos. Sin embargo, en el modelo de las ondas de corte del perfil "Pantalla" se presenta un levantamiento de las capas más profundas hacia la superficie en el sur del perfil (figura 2). Se observa este cambio entre los 380 y 480 m del perfil, lo que podría asociarse a una estructura de "pop up" en flor positiva de los Cerros de Caigüire, lo que eleva material con velocidades sísmicas más altas hacia la superficie. Esta estructura podría indicar la presencia de la traza activa de la Falla El Pilar en este sector. Esta interpretación ubicaría la traza activa de la Falla El Pilar en el pie de los Cerros de Caigüire, a más de 100 m al sur de la estructura principal del hospital (Fig. 1), lo que estaría acorde con la interpretación de Ascanio (1972).

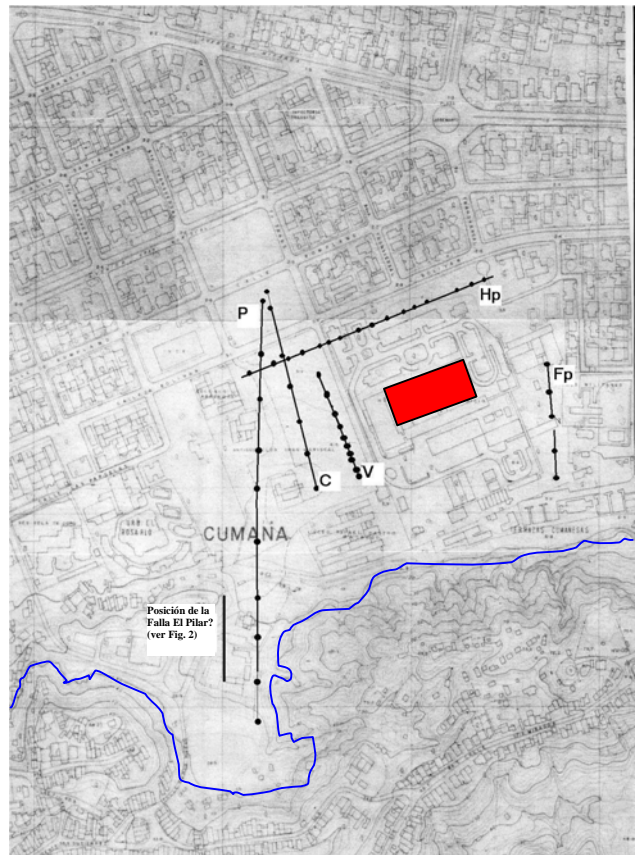


Fig. 1 Ubicación de las líneas sísmicas en torno al hospital, ubicación de la estructura principal del Hospital (rojo), línea de pie de Cerro Caigüire (azul) y posición de la Falla El Pilar según la interpretación del perfil "Pantalla" (figura 2). Hp: Hospital, Fp: Fundasalud, P: Pantalla, C: Club y V: Liceo-Vertical (ubicados en el inicio de los perfiles; los círculos indican las ubicaciones de los disparos).

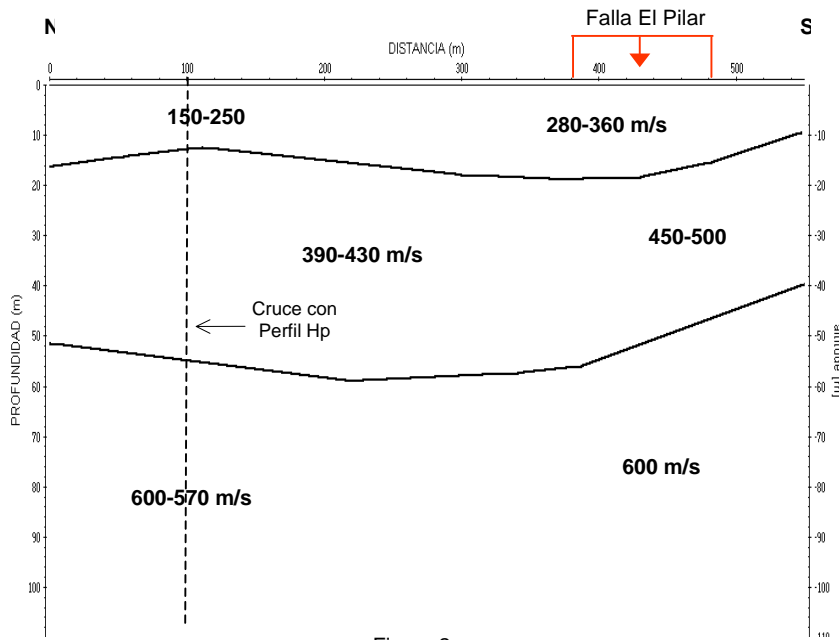


Figura 2.

Modelo de las velocidades de la onda de corte en el perfil "Pantalla" al oeste del hospital (ver figura 1 para su ubicación). En la parte sur se visualiza un ascenso en la profundidad de los estratos, lo que se podría asociar a la existencia de la Falla El Pilar en esta ubicación

### Caracterización Dinámica

**Modelo Generalizado.** Basado en las velocidades sísmicas, los espectros de repuesta han sido calculadas para un perfil de suelo generalizada (Tabla 1) en los alrededores del hospital, considerando 3 sismos diferentes (muy cercano: 1 Km. de distancia; cercano: 10 Km. de distancia y lejano: 54 Km. de distancia, usando acelerogramas disponibles (PEER Strong Motion Database).

| Capa N° | Material | Espesor (m) | Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> ) | Gmax (MPa) | Vs (m/s) | Modulo de Corte     | Curva de Amortiguamiento |
|---------|----------|-------------|------------------------------------|------------|----------|---------------------|--------------------------|
| 1       | ARCILLA  | 5,00        | 15,71                              | 77,53      | 220,00   | Arcilla - PI=10-20  | Arcilla                  |
| 2       | ARCILLA  | 5,00        | 15,71                              | 77,53      | 220,00   | Arcilla - PI =10-20 | Arcilla                  |
| 3       | ARCILLA  | 5,00        | 15,71                              | 77,53      | 220,00   | Arcilla - PI =10-20 | Arcilla                  |
| 4       | ARENA    | 5,00        | 16,65                              | 82,18      | 220,00   | Arena               | Arena                    |
| 5       | ARENA    | 10,00       | 16,65                              | 208,00     | 350,00   | Arena               | Arena                    |
| 6       | ARENA    | 10,00       | 16,65                              | 208,00     | 350,00   | Arena               | Arena                    |
| 7       | ARENA    | 10,00       | 16,65                              | 208,00     | 350,00   | Arena               | Arena                    |
| 8       | ARENA    | 10,00       | 16,65                              | 208,00     | 350,00   | Arena               | Arena                    |
| 9       | ARENA    | 10,00       | 16,65                              | 208,00     | 350,00   | Arena               | Arena                    |
| 10      | ROCA     | Infinito    | 18,54                              | 472,55     | 500,00   | Roca                | Roca                     |

Tabla 1

Perfil Típico del Hospital de Cumana. Muestra las 10 capas consideradas en el modelo genérico. El Nivel Freático esta considerado a los 5 m. El sismo utilizado fue el Imperial Valley , M=6.9, mecanismo transcurrente dextral.

Las condiciones del suelo determinan las características de un sitio, lo que implica que entre sitios cercanos puede haber variaciones fuertes en su respuesta sísmica. Una correlación fuerte entre la distribución de los daños y la geología ha sido evidenciada para sismos fuertes (Rosenbluth y Ovando, 1991). Para efectos de ingeniería, se diferencia entre sedimentos con velocidades de onda de corte debajo de 500 m/s y roca con velocidad mayor a 500 m/s. La nueva norma de edificaciones sismorresistentes en Venezuela (COVENIN, 1998) considera la velocidad de propagación de las ondas de corte como un factor importante en la caracterización del suelo.

### Análisis de los espectros de respuesta

Hasta el periodo de 0,2 s se observa un comportamiento estable de la capa 1 del modelo para un sismo muy cercano, el medio disipa la energía suministrada en la base. A partir de 0,2 s se observa el aumento de las aceleraciones, para  $T= 0,35; 0,5; 0,6$  y  $0,8$  s se alcanzan  $536; 500; 610$  y  $730 \text{ cm/s}^2$  respectivamente para la capa 1. Después de 1,1 s los valores de aceleración de la capa 1 superan en todo momento a los de la base, hasta alcanzar un máximo de  $654 \text{ cm/s}^2$  para 2,25 s (Fig. 3-a).

Hasta el periodo de 0,1 s se observa un comportamiento estable de la capa 1 del modelo para un sismo cercano, el medio disipa la energía suministrada en la base. A partir de 0,1 s se observa el aumento de las aceleraciones, para  $T= 0,14; 0,25$  y  $0,33$  s se alcanzan  $595; 500$  y  $600 \text{ cm/s}^2$  respectivamente para la capa 1. Después de 0,4 s los valores de aceleración de la capa 1 superan en todo momento a los de la base, alcanzando un máximo de  $1000 \text{ cm/s}^2$  para 0,45 s (Fig. 3-b).

Hasta el periodo de 0,04 s se observa un comportamiento estable de la capa 1 del modelo para un sismo lejano (Fig. 3-c), el medio disipa la energía suministrada en la base. A partir de 0,04 s, se observa el aumento de las aceleraciones, para el periodo de 0,2 s se alcanzan los  $362 \text{ cm/s}^2$  para la capa 1. Después de 0,2 s los valores de aceleración de la capa 1 superan en todo momento a los de la base, hasta alcanzar un máximo de  $430 \text{ cm/s}^2$  para 0,3 s.

### Conclusiones

Los modelos de las ondas de corte están representados por tres capas. La capa más superficial fue interpretada como sedimentos cuaternarios de la llanura aluvial, con rango de velocidades entre 150 y 280 m/s y profundidades entre 10 y 20 m. La segunda capa, con velocidades de onda de corte entre los 300 y 500 m/s y profundidades que oscilan entre los 25 y 65 m, se interpreta como sedimentos de la llanura aluvial o del cordón litoral, la última capa es interpretada como sedimentos Plio-Pleistocenos de las formaciones Caigüire y Cumaná, principalmente compuestos por arenas y arcillas intercaladas con gravas y conglomerados, donde las velocidades están comprendidas entre los 460 y 700 m/s.

En la capa superficial, para los tres sismos analizados: muy cercano, cercano y lejano, el medio disipa la energía de las altas frecuencias suministrada en la base (hasta periodos 0,2 s; 0,1 s y 0,04 s respectivamente), lo que indica la presencia de materiales no consolidados sobre la roca equivalente. Luego de cierto valor de periodo (1,1 s para un sismo muy cercano; 0,4 s para un sismo cercano y 0,2 s para un sismo lejano) la aceleración en la capa 1 supera en todo momento a los de la base obteniendo los valores máximos de aceleración ( $654 \text{ cm/s}^2$ ,  $1000 \text{ cm/s}^2$  y  $430 \text{ cm/s}^2$  respectivamente).

No se observan cambios laterales muy bruscos en los modelos sísmicos. Sin embargo, en el modelo de las ondas de corte del perfil "Pantalla" se presenta un levantamiento de las capas más profundas hacia la superficie en el sur del perfil (Fig. 2). Este levantamiento podría asociarse a una estructura de "pop up" en flor positiva de los Cerros de Caigüire, la que eleva material con velocidades sísmicas más altas hacia la superficie. Esta estructura podría indicar la presencia de la traza activa de la Falla El Pilar en esta zona. Esta interpretación ubicaría la traza activa de la Falla El Pilar en el pie de

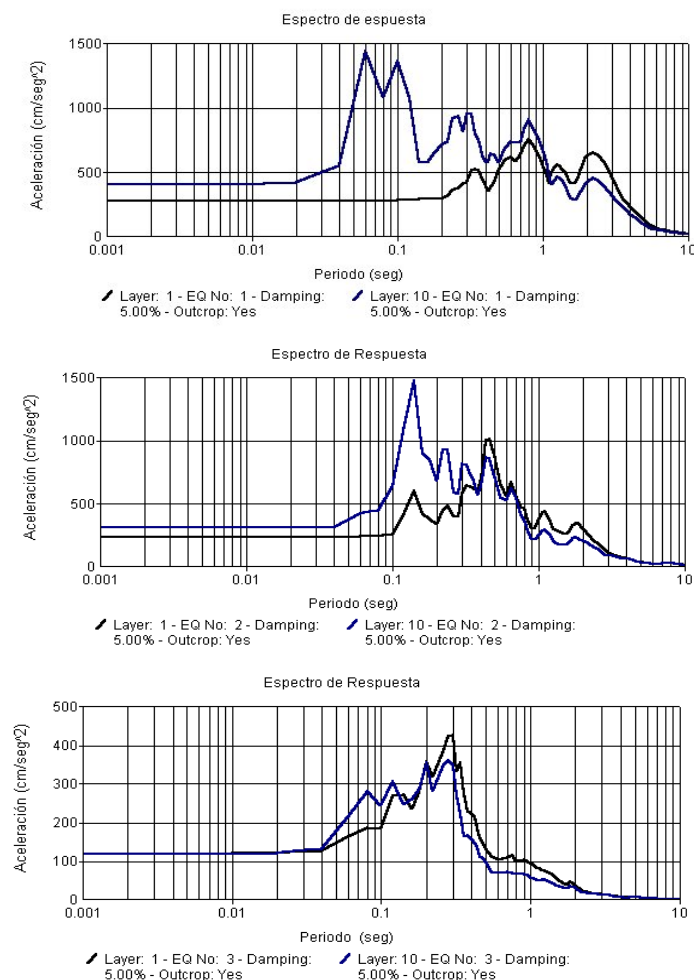


Fig. 3 Espectros de respuestas en superficie (azul) y en la base (negro) a) Arriba: para un sismo muy cercano. b) Centro: Espectro de respuesta para un sismo cercano. c) Centro: Espectro de respuesta para un sismo lejano.

los Cerros de Caigüire, a más de 100 m al sur de la estructura principal del hospital (Fig. 1), lo que estaría acorde con la interpretación de Ascanio (1972).

### Agradecimientos

En la realización de las mediciones sísmicas participaron estudiantes y profesionales del Centro de Sismología de la Universidad de Oriente y de FUNVISIS, a los cuáles agradecemos sus esfuerzos. Las perforaciones y voladuras fueron realizados por la compañía DEMOVOLCA y CAVIM. Agradecemos el apoyo logístico de Defensa Civil Sucre en la realización de las mediciones en una zona urbana con mucho movimiento. El sismómetro usado en las mediciones fue donado a FUNVISIS por la GTZ (Cooperación Alemana).

### Referencias

- Abeki, N., Watanabe, D., Hernández, A., Pernía, A., Schmitz, M. & Avendaño, J., 1998. Microtremor observations in Cumaná city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, Rotterdam, 613-618.
- Ascanio, G., 1972. Geología de los cerros de Caigüire, Cumana, Estado Sucre. IV Congreso Geológico Venezolano, pp. 1279-1288.
- Audemard, F., 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, 12-14 de Mayo de 1999, 11 pp.
- Beltrán, C. & Giraldo, C., 1989. Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela. VII Congreso Geológico Venezolano, Barquisimeto, pp. 1000-1021.
- Beltrán, C. & Rodríguez, J.A., 1995: Ambientes de sedimentación fluvio-deltaica y su influencia en la magnificación de daños por sismos en la ciudad de Cumaná, Venezuela. II Coloquio Internacional de "Microzonificación Sísmica", V Reunión de Cooperación Interamericana, Corporinete, Cumaná, Venezuela, 12 pp.
- Beltrán, C., Singer, A. and Rodríguez, J.A., 1996. The El Pilar Fault active trace (northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. Third ISAG, St. Malo, 153-156.
- COVENIN, 1998. COVENIN 1756-98, Revisión 2001 - "Edificaciones Sismorresistentes", Ministerio de Desarrollo Urbano – FUNVISIS.
- Franke, M., Quijada, P., Gajardo, E., Muñoz, M.I. and Villaseñor, A., 1993. Microsismicidad y amenaza sísmica de la región nororiental de Venezuela. VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería sismorresistente y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural, Merida, S-80-S-90.
- Giraldo, C. y Beltrán, C., 1988. Evaluación del campo de esfuerzos durante el Cuaternario en la región nororiental de Venezuela (Proyecto CONICIT S1-1161). FUNVISIS, 68 pp.
- Grases, J. (1990) *Terremotos destructores del Caribe. 1502-1990*. 1° ed., Orcyt-Unesco, Montevideo, Uruguay. 132 pp.
- Lang, D. H., Raschke, M., Schwarz, J., 1999. The Cariaco, Venezuela, Earthquake of July 09, 1997: Aftershock Measurements, Macroseismic Investigations and Engineering Analysis of Structural Damage. VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida, 12-14 de Mayo de 1999, 12pp.
- Lang, D. H., Raschke, M., Schwarz, J., 2002. The Cariaco, Venezuela, Earthquake of July 09, 1997: Aftershock recordings, site response studies and macroseismic investigations. *Tectonophysics*, submitted.
- OPS (Grases, J., Malaver, A. y Giraldo, C.), 1994. Estudio de la vulnerabilidad del hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Organización Panamericana de Salud, Caracas.