

Caracterización de suelos con métodos geofísicos, estado Vargas (La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena)

Marcos Romero^{1,2}, Analia Cragno^{1,2}, Ricardo Ambrosio^{1,2}, Michael Schmitz^{1,3}, Jorge González^{1,4}

¹FUNVISIS, Departamento de Sismología, mschmitz@funvisis.org.ve

²FUNVISIS, Departamento de Ingeniería Sísmica, jorgeg@funvisis.org.ve

³Universidad Central de Venezuela, Escuela de Geología, Minas y Geofísica,
Dpto. de Geofísica, romeromarcos1974@yahoo.com

Resumen

Las lluvias caídas en diciembre de 1999 en el estado Vargas, causaron numerosos derrumbes, deslizamientos y flujos torrenciales. Además, esta zona posee una elevada amenaza sísmica, evidenciada con los daños ocurridos en el sismo de Caracas de 1967. Se aplicaron tres métodos geofísicos en el presente estudio: sísmica de refracción, gravimetría y ruido ambiental. Con los valores de la onda de corte se determinó que en los conos los sedimentos están distribuidos básicamente en tres capas. El nivel freático se ubicó entre los 5 y 10 m de profundidad. La máxima profundidad del basamento rocoso se encuentra a 450 m en la costa de Caraballeda con buzamientos entre los 17° y 21° hacia el norte. Los valores de Período Fundamental de vibración del suelo predominantes se ubican entre 0.9 – 1.8 segundos. Se realizaron los espectros de respuesta para sismo muy cercano, cercano y muy lejano.

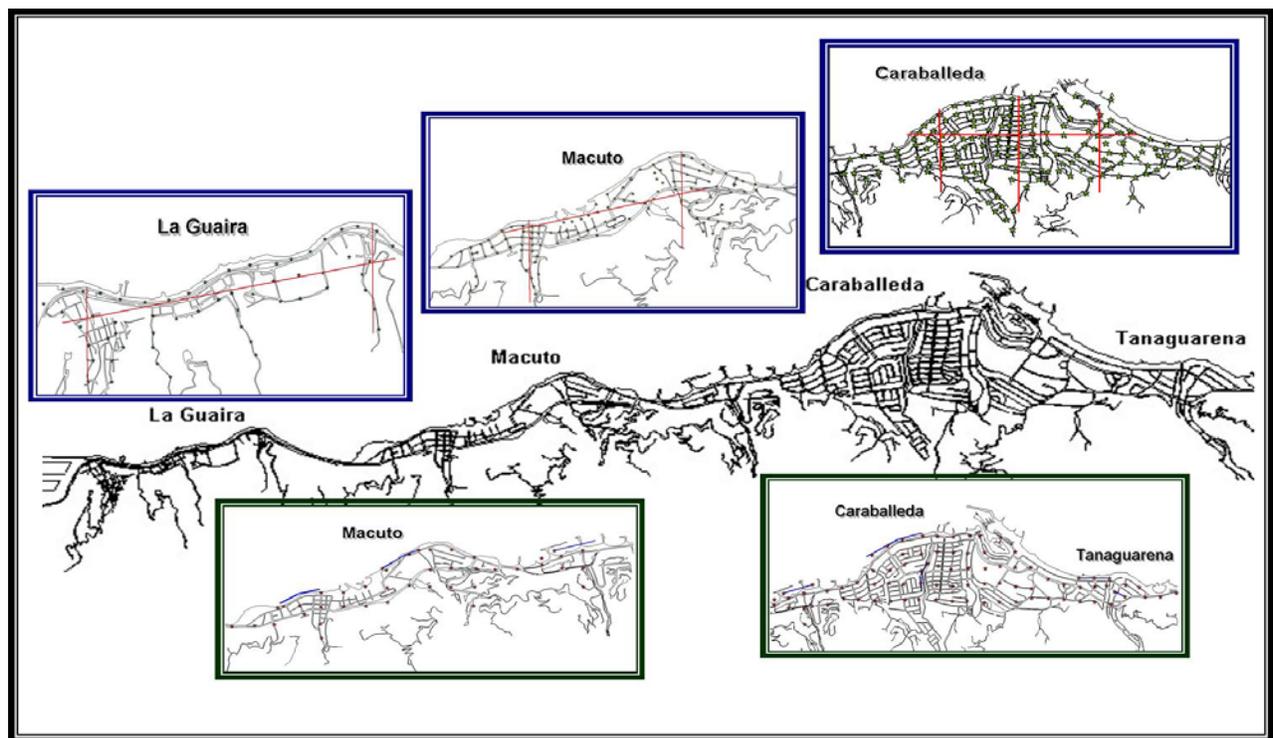


Fig. 1

Arriba (marco azul): estaciones y perfiles gravimétricos. Abajo (marco verde): estaciones de ruido ambiental y perfiles sísmicos. (Cragno & Romero, 2001; Ambrosio, 2001)

Introducción

En la zona de Caraballeda, donde ocurrieron los mayores daños en el Litoral durante el sismo de Caracas de 1967, se investigó la conformación de los sedimentos mediante perfiles sísmicos y perforaciones (e.g. Weston INC, 1969; Lineham & Murphy, 1974; FUNVISIS, 1978). En estos estudios se realizaron varias líneas sísmicas de refracción con longitudes hasta 1.5 Km., mediante las cuales se determinaron profundidades del basamento de hasta 400 m., sin que se hayan reportado los datos originales. Los suelos que forman este depósito aparentemente son en gran parte suelos granulares gruesos, que van desde arenas y gravas, hasta peñones de dimensiones considerables; estos sedimentos son provenientes de la falda norte de la serranía del Ávila, como producto de la meteorización y arrastre de materiales de origen gnéisico y esquistoso (FUNVISIS, 1978). Los objetivos principales del presente estudio se orientan en primer lugar a evaluar la geometría de los conos aluviales aplicando sísmica de refracción y ruido ambiental, y la caracterización del basamento rocoso a partir de su respuesta gravimétrica con la construcción de un modelo del mismo que tome en cuenta su forma y ubicación en profundidad. A partir de los modelos obtenidos de la sísmica se evaluara la respuesta dinámica del suelo.

Métodos geofísicos

Sísmica de Refracción. Se procesaron e interpretaron un total de 10 perfiles sísmicos; 4 en los conos de Macuto, 4 en el cono de Caraballeda y 2 en Tanaguarena (Fig. 1), adquiridos bajo parámetros distintos. Los perfiles variaban en longitud, desde 188 m hasta 960 m, y la apertura entre geófonos fue igualmente variable, pero constante en cada línea, dependiendo de la longitud de los perfiles. El equipo empleado para la adquisición de todos los perfiles fue un sismógrafo Geometrics Strata View de 48 canales. Los receptores variaron para los distintos perfiles adquiridos (horizontales y verticales). Se utilizaron dos tipos de fuente; Mandarria y pólvora negra. Los datos fueron procesados y modelados con el programa REFLEXW.

Ruido Ambiental. Se midieron un total de 130 estaciones en las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena. El mallado prediseñado para la ubicación de las estaciones fue de 250 m limitado a los conos aluviales. Se tomaron muestras de 300 segundos, registrando las componentes NS, EW y UD. El equipo utilizado para la adquisición de los datos de ruido ambiental fue un *Nanometrics* modelo *Orion-3S* y un sensor *Guralp* modelo *CMG-40T-0008*, con una respuesta plana entre 30 segundos–50 Hz. Para el procesamiento de los datos, se seleccionaron 2 ventanas de 30 segundos donde la señal es mas estable, para cada componente, de cada ventana se obtuvo el espectro de Fourier y la relación H/V (Nakamura 1989), las mismas fueron graficadas para obtener los valores de periodos fundamentales del suelo (Cragno & Romero 2001).

Obtenido los valores de periodo de cada ventana, y estos no superar los 0,2 segundos de diferencia entre si, los mismos se promediaban y se obtenía el valor de periodo definitivo. En caso contrario, se realizó una secuencia de reprocesamiento, donde se tomaron todas las ventanas posibles de 30 segundos, sin solape (hasta 10 en total). Para cada ventana se calculó el Espectro de Fourier, promediándose las componentes y la relación H/V con los valores obtenidos para lograr el valor de periodo definitivo.

Gravimetría. El levantamiento de estaciones gravimétricas se llevó a cabo mediante la realización de circuitos de aproximadamente 2 horas de tiempo, el número de estaciones por circuito es variable. Se levantaron 169 estaciones en el cono de Caraballeda, 122 estaciones en el cono de Macuto y 57 estaciones en el cono de La Guaira, para un total de 348 estaciones. El instrumento utilizado fue un Gravímetro LaCoste & Romberg modelo G-452. La estimación de las densidades de los sedimentos utilizadas en los modelos se llevó a cabo utilizando la fórmula expuesta por Dobrin (1976) a través de estudios de la relación entre la velocidad de propagación de ondas P y la densidad de sedimentos saturados realizados por Nafe *et al.* (1957) y Gardner *et al.* (1974).

Resultados obtenidos

Sísmica de Refracción. Los modelos realizados a partir de las ondas P en las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena indican que los sedimentos estan distribuidos basicamente en tres capas: la primera es interpretada como sedimentos sueltos con velocidades de ondas entre 360 y 720 m/s y profundidad de la base del estrato entre 4 y 16 m. La segunda capa muestra rangos de velocidades entre 1740 y 1850 m/s y profundidades que varían entre 25 y 90 m, asociada a sedimentos saturados de agua. Y la tercera capa con un rango de velocidades de 2320 m/s y 2850 m/s. En

estos casos, la tercera capa se observó por la variación de la velocidad entre la capa saturada y la capa de material mas compactado.

Para los modelos "S" se observaron tres capas, en la mayoría de los casos. En la primera capa se observan rangos de velocidades entre 215 m/s y 400 m/s, con profundidades que varían entre los 10 y 25 m en Macuto y Caraballeda; entre 5 y 10 m en la antigua laguna de Tanaguarena y de 50 m de profundidad en la costa de Tanaguarena, estrato que se ha asociado a sedimentos aluvionales. Para la segunda capa obtenida en los perfiles, se observan velocidades entre los 425 m/s y 570 m/s y sus profundidades varian entre 30 y 86 m, estas velocidades corresponden a una litología conformada por sedimentos compactados.

La tercera capa, en los perfiles realizados en los conos de Macuto y tanaguarena las velocidades varían entre 600 y 750 m/s. En el perfil realizados en el cono de Tanaguarena específicamente a nivel de la costa solo se observaron dos capas y en el perfil realizado donde se encontraba la antigua laguna de Tanaguarena se obtuvo una velocidad alrededor de los 1100 m/s para la tercera capa. Estas velocidades observadas en la tercera capa se han asociado a sedimentos consolidados (Cragno & Romero, 2001).

En concordancia con el trabajo realizado por Castilla (1999), los resultados indican que el nivel freático esta a poca profundidad en la zona, evidenciado en los modelos realizados a partir de las ondas P, donde se observó a una profundidad cercana a los 10 m, en todo el área de trabajo.

Velocidad Promedio. Con las velocidades de ondas de corte (ondas S) obtenidas en los perfiles sísmicos realizados, se establecieron los rangos de velocidades promedio para los primeros 30 m, importante para el comportamiento sísmico de estructuras bajas. (NEHRP, 1997)

Siguiendo lo establecido en la Norma COVENIN, para la zona de estudio se clasificaron los suelos duros o densos, medianamente rígidos, con velocidades promedio entre $250 < V_s < 400$ m/s (Fig 2).

La presencia de estos suelos es notoria a lo largo de la totalidad de la zona, sobre todo en Macuto hasta Qda. Seca. (COVENIN, 1998)

De igual forma, se observan suelos muy duros o muy denso, rígidos, con velocidades promedio entre $400 < V_s < 500$ m/s en el cono de Caraballeda y parte de Qda. Seca y mayor a los 500 m/s con suelos asociados a roca blanda.

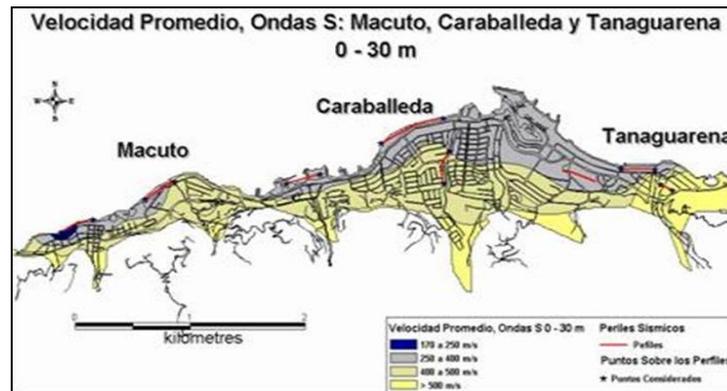


Fig. 2
Mapa de velocidades promedio, ondas S con velocidad de onda menor a los 500 m/s: Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, en los primeros 30 m de profundidad y perfiles sísmicos realizados.

Ruido Ambiental. Los valores de periodo fundamental de vibración del suelo obtenido para la zona de Macuto, se encuentran distribuidos los valores altos de periodo entre 0,9–1,5 segundos; en el cono central (El Cojo) con tendencia a bajar hacia los conos laterales (Macuto y Camurí Chico) entre 0,1–0,6 segundos. (Fig. 3). Guardando la relación que existe entre los valores de período y los espesores de sedimentos, la cual sugiere que a mayores valores de periodo el espesor de la columna sedimentaria debería ser mayor (Nakamura, 1989), se obtuvo que los espesores de sedimentos son mayores hacia el centro de la zona (cono el Cojo) y tienden a adelgazar hacia los bordes (conos de Macuto y Camurí Chico). Cabe destacar que hacia el cono de Camurí Chico se evidencian valores altos de periodo lo cual representaría un nuevo engrosamiento de la columna sedimentaria. Las zonas con los valores de periodos altos corresponden a las desembocaduras de las Quebradas El Cojo y Camurí, donde el aporte de sedimentos es constante, por lo tanto, el espesor de la columna sedimentaria será mayor en esta zona y sus alrededores.

Para la zona de Caraballeda los valores altos de periodos los encontramos hacia el centro (Pta. Caribe) entre 1,5–1,8 segundos. Hacia Pta. Caraballeda y Qda. Seca los valores de periodo disminuyen levemente ubicándose entre 0,6–1,2 segundos. La mayor parte de la zona esta asociada a altos valores de periodo

En Tanaguarena, se encontraron puntos donde los valores de periodo son bajos (entre 0,3–0,6 segundos) debido a la poca separación entre la montaña y la costa; el ancho del cono de Tanaguarena es mucho menor que el de Caraballeda. En la zona costera de Tanaguarena, se tienen altos valores de periodo (entre 0,9–1,2 segundos), se suponen espesores de sedimentos mayores (Cragno & Romero, 2001).

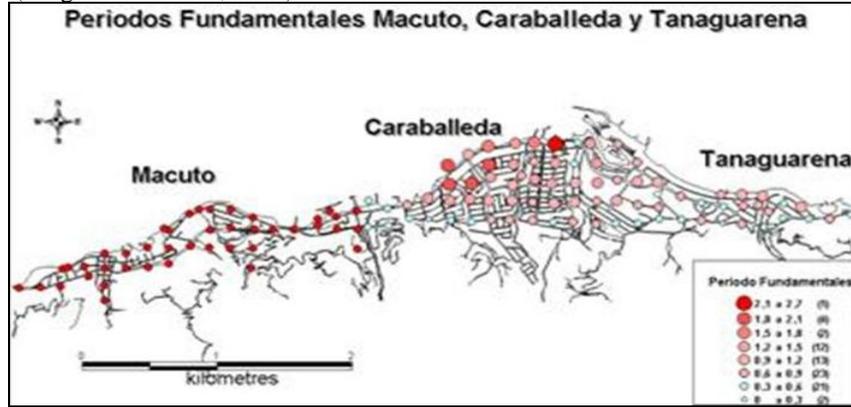


Fig. 3

Mapa del período fundamental de vibración del suelo para las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena.

Gravimetría. En el mapa de anomalías de Bouguer se observa que las curvas muestran una tendencia general en la dirección este- oeste, todas con valores máximos hacia el sur y mínimos hacia el norte. La figura 4-a muestra la tendencia general de las curvas a lo largo de toda la zona de estudio; en esta gráfica se puede observar la continuidad lateral de las curvas y el comportamiento del gradiente es homogéneo de este a oeste.

Las formaciones que afloran en los diferentes cortes fueron controladas en superficie con base en la geología existente, la cual se expone en los mapas geológicos de La Guaira y Caraballeda elaborados por Barboza & Rodríguez (2001) y Cano & Melo (2001) respectivamente.

La densidad del basamento, constituido por las rocas de la Asociación Metamórfica de La Costa, fue estimada en base a la descripción litológica de las formaciones que la conforman. Para la Asociación Metamórfica de La Costa la densidad considerada fue de 2,69 gr/cm³ y para el Aluvión (Qal) la densidad varía entre 1,9-2,25 gr/cm³ con un promedio de 2,065 gr/cm³ (Ambrosio, 2001).

Todos los perfiles modelados muestran como característica principal el tope del basamento rocoso, en el cual se observa siempre un marcado buzamiento hacia el norte. De los modelos obtenidos en la sísmica de refracción se interpretó en los conos de Macuto y Caraballeda una división de los sedimentos. En el cono de La Guaira no hay datos sísmicos que permitan ubicar esta división de los sedimentos en profundidad, por este motivo no se incluyó en los perfiles gravimétricos de este cono. Cabe destacar que el diseño del mallado gravimétrico fue realizado con el objetivo primordial de obtener valores de profundidad del basamento, específicamente por el espaciamiento existente entre las estaciones. (Fig. 4-b)

Las mayores profundidades se observan en el cono de Caraballeda, donde alcanza valores máximos cercanos a los 450 m hacia la línea de costa, mientras en el cono de La Guaira se observan profundidades máximas cercanas a los 180 m. El cono de Macuto presenta profundidades cercanas a 200 metros en el lado oeste y a 290 m hacia el este en Punta el Cojo.

(Fig. 4-b) (Ambrosio, 2001).

Espectros de Respuesta Dinámica. En Camurí Chico el espectro muestra que para sismo cercano se obtiene aceleración máximas alrededor de 800 cm/s² para periodos de 0,70 s. Para sismos lejanos la aceleración máxima por debajo de los 350 cm/s² para periodos de 0,3 s. (Fig. 5).

En Los Corales, para sismo cercano se obtienen aceleración máximas superiores a 1500 cm/s² para periodos de 0,9 s. Para sismos lejanos la aceleración máxima supera los 800 cm/s² para periodos de 0,2 s. (Fig. 5). Finalmente en Tanaguarena, un sismo cercano obtendría una aceleración máxima alrededor de 500 cm/s² para periodos de 0,4 s. Para sismos lejanos la aceleración máxima supera los 750 cm/s² para periodos de 2 s. (Fig. 5).

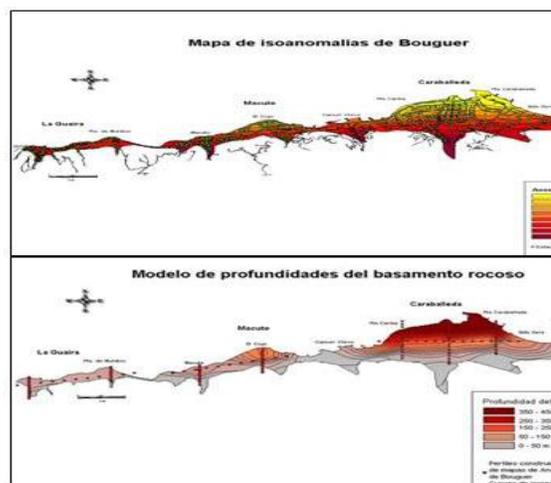


Fig. 4 a)

Arriba: mapa de isoanomalías de Bouguer. b) Abajo: Modelo de profundidades del basamento rocoso; La Guaira – Tanaguarena.

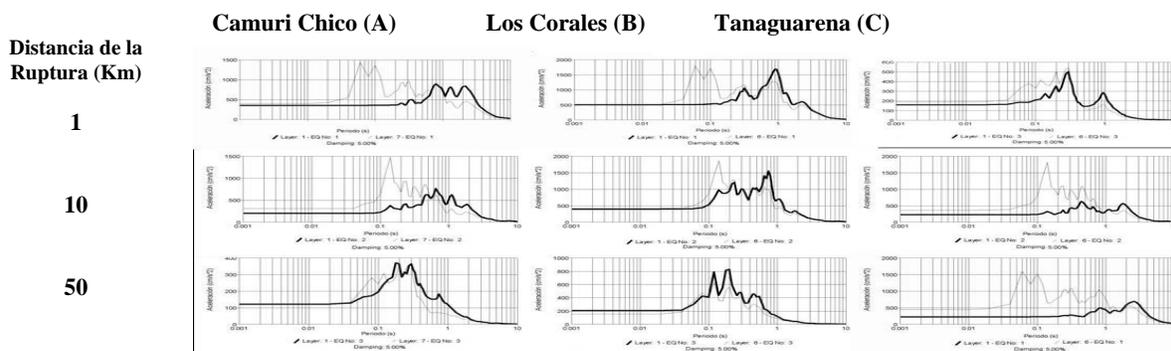


Fig. 5

Espectros de respuestas en superficie (línea gruesa) y en la base (línea fina) para un sismo muy cercano (1 km), para cercano (10 Km.) y otro lejano (50 km), para los modelos obtenidos de los perfiles realizados en Camurí Chico, Los Corales y Tanaguarena.

Conclusiones

En el análisis de las velocidades de las ondas P, el nivel freático se ubica entre 5–10 m de profundidad, obteniendo sedimentos saturados debajo. A partir de los valores de velocidad de onda de corte (ondas S) obtenidos en este estudio, se calculó las velocidades de onda S promedio para los primeros 30 m de profundidad y se interpretaron los sedimentos como suelos duros o densos; con velocidades entre 250 – 400 m/s, presente en la totalidad de la zona, específicamente entre Macuto y Quebrada Seca; suelos muy duros o muy densos; con velocidades promedio entre 400 – 500 m/s, ubicados en el cono de Caraballeda y parte de Quebrada Seca y mayor a 500 m/s, suelos asociado a roca blanda. (Norma COVENIN, 1756-98)

En las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena los valores de Período Fundamental de vibración del suelo predominante se ubican entre 0,9–1,8 s, donde se ha interpretado el mayor de espesor de sedimentos. Apoyado en la relación existente entre Periodo Fundamental y Profundidad de sedimento. (Nakamura, 1989)

El comportamiento de las anomalías de Bouguer observado en la zona de estudio presenta una clara tendencia este-oeste, y un gradiente aproximado, representativo de toda la zona, de 9,8 mgal/Km. La magnitud del gradiente y su mínima variación a lo largo de los perfiles interpretados demuestra una influencia predominantemente regional, debida al basamento, en el comportamiento de las anomalías de Bouguer. El basamento rocoso de los conos aluviales de La

Guaira, Macuto y Caraballeda presenta un fuerte buzamiento hacia el norte, con un ángulo aproximado representativo de toda el área entre los 17° y los 21°. Alcanza profundidades máximas hacia la línea de costa; 450 metros al este del cono de Caraballeda, 180 metros en el cono de La Guaira y de 290 metros en el cono de Macuto específicamente en Punta El Cojo.

Agradecimientos

Se agradece a R. Meza y los estudiantes de la cátedra de Instrumentación del Departamento de Geofísica (UCV) su participación en las mediciones en Macuto y Tanaguarena y J. Suniaga y F. Mendoza su apoyo en la preparación de las voladuras en Marzo-Abril 2001. Se agradece al Destacamento 58 de la GN su apoyo en el manejo del explosivo y V. Rocabado su apoyo en las mediciones y procesamiento de las mediciones de ruido ambiental. Igualmente a J. Sánchez por el apoyo prestado en las mediciones y procesamiento de las mediciones gravimétricas.

Referencias

- Ambrosio, R. 2001. Modelaje gravimétrico del basamento de los conos aluviales de La Guaira, Macuto y Caraballeda, Estado Vargas. Trabajo especial de grado, Departamento de Geofísica, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito. 105 p.
- Barboza, L & Rodríguez, S. 2001. Integración de la geología del estado Vargas y del flanco sur del Macizo del Ávila al norte de Caracas. Trabajo especial de grado, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito. 316 p.
- BSSC-NEHRP, 2000. NEHRP Recommended Provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Part 1: Provisions (FEMA 368) ; Part 2: Commentary (FEMA 369). Prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC. (www.bssconline.org/NEHRP2000/)
- Cano, V. & Melo, L., 2000. Evaluación preliminar de las quebradas Anauco y Catuche en ocasión de las lluvias sucedidas durante el mes de noviembre, 2000. Departamento de Ciencias de la Tierra, FUNVISIS. Informe inédito para el Ministerio de Ciencia y Tecnología, 3 p.
- Castilla, R., 2000. Facies sedimentarias del abanico de Caraballeda y su relación con la posible licuación de suelos ocurrida durante el sismo de caracas de 1967. Univ. Central de Venezuela, Fac. de Ing., Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Investigación aplicada. 24 p.
- COVENIN, 1998. COVENIN 1756-98, Revisión 2001 - “Edificaciones Sismorresistentes”, Ministerio de Desarrollo Urbano – FUNVISIS.
- Cragno, A. & Romero, M., 2001. Evaluación geofísica integral de los conos aluviales de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena. Trabajo especial de grado, Departamento de Geofísica, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito. 316 p.
- Dobrin, M. 1976. Introduction to geophysical prospecting. McGraw Hill, New York, 485 p.
- 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. A: 517.
- Gardner, G.H. F., L. W, Gardner, & A. R. Gregory. ,1974. Formation velocity and density: the diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39: 770-780.
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Qr of rtri*, VOL 30, NO 1, FEB 1989.