

# DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES P Y S DE LAS UNIDADES ROCOSAS AFLORANTES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MÉRIDA, VENEZUELA

Juan M. Dagert<sup>1</sup>; José E. Choy<sup>1</sup>; Reina Aranguren<sup>1</sup>; Milgreya Cerrada<sup>2</sup>; Stephanie Klarica<sup>1</sup>

**Forma de citar:** Dagert, J.M., Choy, J., Aranguren, R., Cerrada, M., Klarica, S. 2015. Determinación de velocidades P y S de las unidades rocosas aflorantes en el área metropolitana de Mérida, Venezuela. Boletín de Geología, 37 (1): 75-81.

## RESUMEN

Para los alrededores del área metropolitana de Mérida se determinó, mediante sismica de refracción, las velocidades de propagación de las ondas P ( $V_p$ ) y S ( $V_s$ ) en los afloramientos de los distintos tipos de rocas predominantes de las asociaciones Sierra Nevada, Tostos y Mucuchachí, y las formaciones Palmarito, Sabaneta, La Quinta, Aguardiente, La Luna y San Javier. Para los casos de las asociaciones Sierra Nevada y Tostos, la  $V_s$  se calculó a partir de la  $V_p$  y el coeficiente de Poisson. La extensión de las líneas sísmicas varió de 24 m a 26 m, utilizando en todos los casos 48 geófonos verticales e igual número de horizontales, y como fuente de energía una mandarina. La adquisición de los registros sísmicos fue llevada a cabo directamente sobre los afloramientos, por lo que en los casos de rocas más competentes no se pudo insertar directamente los geófonos, y como medida alternativa se utilizó la técnica de insertarlos en bloques de concreto. Los arribos de las ondas P se obtuvieron de los registros de los geófonos verticales y los de la S (SH) de los horizontales. Los resultados de este trabajo ofrecen, información de las velocidades de las ondas P y S de las principales tipo de roca en superficie, y puede servir de complemento a investigaciones de sismica profunda.

**Palabras clave:** Sismica de refracción, ondas P y S, afloramientos rocosos, zona metropolitana de Mérida

## VP AND VS DETERMINATION OF THE OUTCROPING ROCK UNITS IN THE MERIDA METROPOLITAN AREA, VENEZUELA

## ABSTRACT

For the predominant rock type of outcrops in the surroundings of the metropolitan area of Mérida city, compressional ( $V_p$ ) and shear ( $V_s$ ) wave velocities were determined using seismic refraction. These outcrops correspond to the Sierra Nevada, Tostos, and Mucuchachí Associations, and Palmarito, Sabaneta, La Quinta, Aguardiente, La Luna, and San Javier formations.  $V_s$  values for Sierra Nevada and Tostos Associations were estimated from  $V_p$  values and laboratory measured Poisson ratio. The length of the seismic lines ranged from 24 m to 26 m, using for all cases 48 vertical geophones and an equal number of horizontal geophones. A sledgehammer was used as energy source. The seismic acquisition was carried out directly from the outcrops. However, for the cases of more competent rocks, the geophones could not be placed directly, so they were inserted in concrete blocks to keep them firm and vertical. The P waves arrivals were obtained via the vertical geophones and the S (SH) waves arrivals were obtained via the horizontal geophones. The results of this investigation offer information of P and S wave velocities of the main surface rock types, which could be useful as complementary data for future deep seismic sounding studies.

**Keywords:** Seismic refraction, compressional wave, shear wave, rocky outcrops, metropolitan area of Mérida

<sup>1</sup>Laboratorio de Geofísica, <sup>2</sup>Grupo de Investigación en Geología Aplicada  
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela,  
juanmanueldagert@hotmail.com, choy@ula.ve, reinaj@ula.ve, milgreya@ula.ve, klarica@ula.ve

## INTRODUCCIÓN

El área metropolitana de la ciudad de Mérida, en constante crecimiento poblacional, se encuentra en el centro de la Cordillera de los Andes venezolanos cuya tectónica la define como una zona sísmicamente activa y en la cual han ocurrido terremotos de magnitud elevada (<http://www.sismicidad.ciens.ula.ve>). Por ello, el Laboratorio de Geofísica de la Universidad de Los Andes (<http://lgula.ciens.ula.ve>), la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (<http://www.funvisis.gob.ve>) y la Fundación para la Prevención del Riesgo Sísmico (<http://celeste.ciens.ula.ve>), llevan a cabo el Proyecto de Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos. La presente investigación contribuye con el proyecto mencionado al proporcionar datos (valores de  $V_p$  y  $V_s$ ) útiles en la predicción del movimiento fuerte del suelo, un aspecto primordial en la cuantificación de la amenaza sísmica. En el proyecto antes nombrado, se contempla en un futuro utilizar el modelado sísmico como una herramienta importante que permita, a través de simulaciones numéricas, analizar la respuesta espectral del suelo en función de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en el basamento rocoso, así como

también, el efecto de las mismas en las edificaciones (Schnabel *et al*, 1972; Rocabado *et al*, 2006; y Tromp, 2007). Una de las fases preliminares para llevar a cabo las simulaciones, es la determinación de los valores de las velocidades de las ondas de compresión ( $V_p$ ), de las ondas transversales ( $V_s$ ) en las principales formaciones rocosas del área de interés. Por ello el presente trabajo tiene como objetivo obtener los correspondientes valores de estos parámetros físicos para las principales formaciones y asociaciones rocosas en los alrededores de la ciudad de Mérida.

## METODOLOGÍA APLICADA

### Selección de los sitios a medir

La selección de las unidades a estudiar se hizo a partir de la cartografía geológica existente (FIGURA 1). Se examinó un gran número de sitios para ubicar los afloramientos menos meteorizados y fracturados. Los afloramientos seleccionados son de fácil acceso y con una topografía regular de al menos 25 a 60 m de longitud. Las líneas sísmicas se encontraban alejadas de fuentes de ruido que pudieran interferir en los registros, tales como tendidos eléctricos, carreteras, ríos, entre otros.

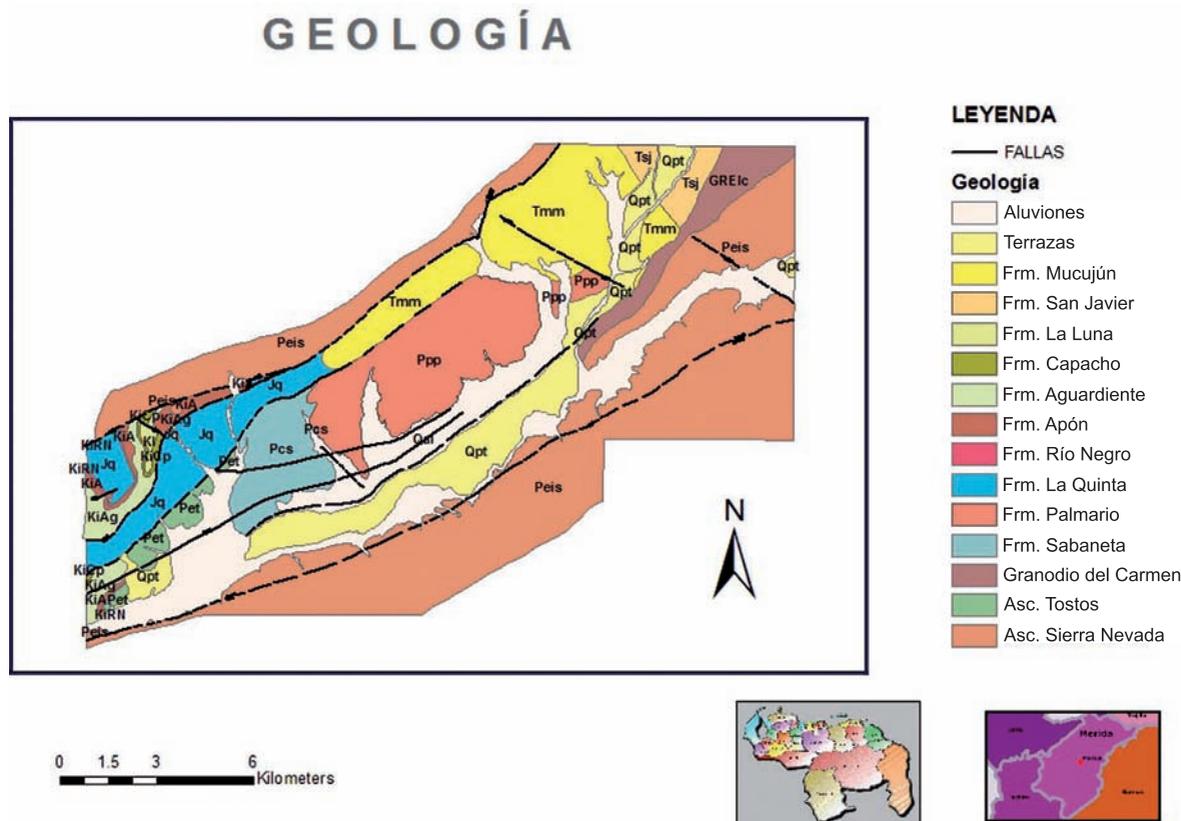


FIGURA 1. Geología del área de estudio. Mapa original de Montilla, *et al* (2007), tomado de Zambrano (2009)

## Descripción de los equipos

En la adquisición de los nueve perfiles sísmicos se utilizaron dos registradores Geode (que incluyen el programa de adquisición *Seismodule Controller*) de 24 canales, de la casa *Geometrics*, (<http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/>), además de 48 geófonos para registrar los movimientos verticales y 48 geófonos para registrar los movimientos horizontales; ambos tipos de geófonos modelo GS-20DM, de frecuencia natural de 14 Hz, fabricados por Geospace (<http://www.geospace.com/index.php?id=110>). Estos geófonos tienen una punta que se debe insertar para acoplar el sensor con los movimientos del suelo; cuando el suelo es demasiado duro (como por ejemplo en roca) y no es posible el clavar dicha punta, es necesario recurrir a otras técnicas, como se describe en la sección siguiente. Como fuente de energía sísmica se utilizó una mandarina de siete kilogramos. Para las generar las ondas S, se utilizó una punta de eje de 60 cm de longitud que se insertó como mínimo 30 cm (FIGURA 2).



FIGURA 2. Bloques con sus respectivos geófonos insertados y el proceso de introducir la punta de eje.

## Ensayos previos

Con el fin de determinar una manera de superar la limitación de no poder insertar los geófonos en la roca, se experimentó con la técnica de acoplar los geófonos al suelo rocoso utilizando bloques. Dichos bloques se construyeron de cemento, con forma de paralelepípedo rectangular, de un peso aproximado de 2,9 kg y de un volumen de 1.200 cm<sup>3</sup>.

Se realizaron tres ensayos, tanto en adquisición como en el procesamiento Dagert (2010). Esta idea fue desarrollada a partir de la metodología del *Land*

*Streamer* publicada en *Geometrics* (1999) ([www.geometrics.com](http://www.geometrics.com)).

Se establecieron varios perfiles donde se midió con bloques y sin estos. En el primer ensayo, realizado en una de las áreas verdes de la Facultad de Ciencias de la Universidad Los Andes, se estableció un tendido mixto, alternando geófono en suelo con geófonos en bloque. En los registros no se observaron diferencias en la primera llegada, independientemente del uso o no de los bloques tal como se ve en la FIGURA 3, donde las flechas indican las señales correspondientes a los geófonos sostenidos por los bloques. En estacionamiento de la Venezuela de Antier y en las minas de cal, vía Jají se realizaron los otros ensayos. En cada sitio se realizaron primero líneas con los geófonos insertados en el suelo y luego con los geófonos insertados en bloque. En ambos casos, los resultados muestran que los bloques no afectan de manera significativa la primera llegada, demostrándose así que el método de adquisición es perfectamente adecuado. En la TABLA 1 se muestra las velocidades obtenidas con y sin bloques.

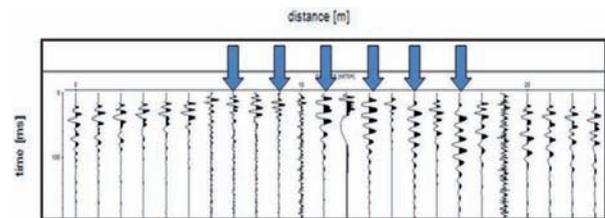


FIGURA 3. Registro de prueba. Se colocaron geófonos con bloques (flechas azules) y geófonos sin bloques en un mismo perfil, para verificar la metodología de los bloques.

TABLA 1. Valores obtenidos de las velocidades de las ondas P y S (en el que especifica el tipo de adquisición) de las formaciones rocosas.

Descripción de las Unidades	V <sub>p</sub> (km/s)	V <sub>s</sub> (km/s)
<b>Gneis</b>		
(Asociación Sierra Nevada)	2,56(CB)	1,55(CP*)
Esquistos (Asociación Tostos)	3,07(CB)	1,98(CP**)
<b>Pizarra (Asociación Mucuchachí)</b>		
Filita (Frm. Palmarito)	1,10(SB)	0,524(SB)
Conglomerado (Frm. Sabaneta)	0,79(CB)	0,469(CB)
	0,87(SB)	0,638 (SB)
<b>Conglomerado (Frm. La Quinta)</b>		
Arenisca (Frm. Aguardiente)	3,49(SB)	1,71(SB)
Calizas (Frm. La Luna)	1,66(CB)	1,06 (CB)
Arenisca (Frm. San Javier)	1,64(SB)	0,823(SB)

CB: medido con bloque, SB: medido sin bloque, CP\*: Calculado con el coeficiente de Poisson a partir de medidas en laboratorio, CP\*\*: Calculado con el coeficiente de Poisson de la pizarra de Mucuchachí.

### Adquisición de datos de sísmica de refracción

Para el registro de las ondas longitudinales y transversales, se establecieron cinco (5) puntos de disparos. Para el caso de las ondas P, se siguió el procedimiento usual de golpear verticalmente sobre una placa de aluminio como se explica en Zambrano (2009). Para las ondas S (FIGURAS 2 y 4), se golpeó en forma horizontal una punta de eje de 60 cm de longitud y clavada en el suelo 50 cm aproximadamente.

En el caso de las rocas metamórficas de las asociaciones Sierra Nevada y Tostos no fue posible adquirir Vs a través de la sísmica de refracción, por no poder insertar la punta de eje en el suelo. En estos se determinó la velocidad de la onda P por el método de los bloques (FIGURA 5), y la Vs combinando la Vp con el coeficiente de Poisson. Para los gneises de la Asoc. Sierra Nevada el coeficiente se obtuvo a través de ensayos de laboratorio, mientras que para los esquistos de Tostos se utilizó el de las pizarras de Asociación Mucuchachí.



FIGURA 4. Tendido sísmico para la adquisición de las ondas transversales en los conglomerados de la Fm. Sabaneta.



FIGURA 5. Tendido sísmico para la adquisición en los gneises de la Asociación Sierra Nevada.

### Procesamiento de los datos de sísmica de refracción

Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa REFLEX 4.2 (Sandmeier, 2007. <http://www.sandmeier-geo.de>), tanto para selección del tiempo de primeras llegadas de las ondas P y S, como para la construcción de las curvas camino - tiempo, en donde se emplearon los módulos 2D-data-analysis y el módulo Tiempo de viaje (*traveltime*) respectivamente, con el fin de determinar las velocidades P y S.

### Determinación coeficiente de Poisson

La determinación del coeficiente de Poisson de los gneises de la Asociación Sierra Nevada se llevó a cabo mediante ensayos de laboratorio. Para esto, se extrajo un núcleo cilíndrico, de la muestra tomada en el afloramiento, de 9,5 cm de altura y 5 cm de diámetro, el cual se sometió a compresión utilizando una prensa universal. La curva resultante es una gráfica de esfuerzo contra deformación, que permite calcular el coeficiente de Poisson a partir de la ecuación siguiente:

$$\nu = \frac{\frac{\delta T}{D}}{\frac{\delta L}{L}}$$

Donde  $L$  es la altura del núcleo cilíndrico,  $D$  es el diámetro del mismo,  $\delta L$  es la deformación longitudinal y  $\delta T$  es la deformación diametral. Los valores de deformación utilizados fueron los correspondientes al punto de ruptura del núcleo.

En el caso de los esquistos de la Asociación Tostos no se pudo obtener un núcleo ya que la muestra de roca se encontraba altamente foliada, por lo que el coeficiente de Poisson se calculó utilizando mediante  $V_p$  y  $V_s$  utilizando los valores de las pizarras de la Asociación Mucuchachí. Esta consideración se pudo establecer porque los esquistos de la Asociación Tostos y las pizarras de la Asociación Mucuchachí tienen propiedades similares (Léxico Estratigráfico de Venezuela). Finalmente, se determinó el valor de  $V_s$ .

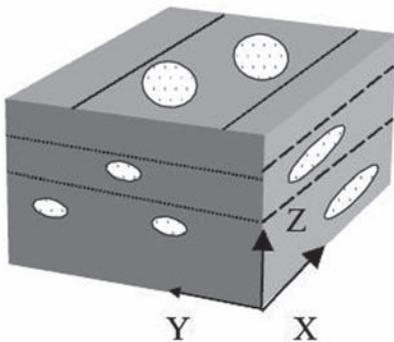
### Resultados e interpretación

Los resultados del coeficiente de Poisson, calculados para las rocas metamórficas (gneises y esquistos) se muestran en la TABLA 2. En la TABLA 1 se sintetizan los valores de las velocidades P y S adquiridos con bloque, sin bloque y los calculados con el coeficiente de Poisson de las rocas de los sitios muestreados.

**TABLA 2.** Valor obtenido del coeficiente de Poisson

Descripción	Coefficiente de Poisson
Gneis (Asociación Sierra Nevada)	0,209
Esquisto (Asociación Tostos)	0,290

Para las rocas metamórficas foliadas, la velocidad (máxima y mínima) de onda va a depender de la dirección de su propagación con respecto a los planos de foliación (Rodríguez-Sastre y Calleja, 2006). En la FIGURA 6 se representa un bloque de una roca foliada y se definen tres ejes X (paralelo a la alineación), Y (perpendicular a la alineación dentro de la foliación) y Z (normal a los planos de foliación) en los diferentes planos de la roca. Si suponemos un vector de propagación de la onda, que atraviesa la roca por el plano XY, es decir, formando un ángulo de 0° con la foliación, la velocidad va a ser menor que si se propaga por los planos XZ o YZ. La velocidad máxima se obtiene si el vector de propagación está contenido en el plano YZ, es decir, formando un ángulo de 90° con la foliación. (Rodríguez-Sastre y Calleja, 2006). Según estos autores, quienes realizaron ensayos con pizarras, los valores mínimos de velocidades que se pueden obtener, corresponden aproximadamente a la mitad de los valores teóricos máximos posibles. Considerando esta idea, es de esperar que las velocidades obtenidas para los esquistos de Tostos, sean intermedias (no mínimas), ya que el tendido sísmico se estableció casi perpendicular a la foliación del afloramiento y por lo tanto, las ondas se propagaron aproximadamente perpendiculares a los planos de foliación (XZ). Caso similar ocurrió para los valores de las velocidades para las pizarras de Asociación Mucuchachí. Ahora bien, para las filitas de la Frm. Palmarito, como se esperaba, las velocidades fueron mínimas, ya que la dirección de propagación de las ondas fue aproximadamente paralela a los planos de foliación.



**FIGURA 6.** Bloque de roca foliada. Se definen los ejes X, Y y Z a través de los estratos foliados.

Los valores de las velocidades de las ondas P y S obtenidos fueron afectados por el fracturamiento y la meteorización de los afloramientos rocosos, lo que explica que los valores sean más bajos que los rangos publicados por otros autores (Cantos, 1973; González de Vallejo, 2002; Hudson, 1993). Sin embargo, estos valores se adaptan a las condiciones de la zona de estudio a partir de la cual se desean realizar las simulaciones sísmicas, por lo que son aceptables como información de entrada en dichos modelos, en una primera aproximación.

En la FIGURA 7 se compara los valores de  $V_p$  vs  $V_s$  obtenidos en este trabajo con los presentados por Brocher (2005), quien elaboró ecuaciones empíricas que relacionan  $V_p$  y  $V_s$  para cualquier litología en zonas superficiales y profundas utilizando datos de un área tectónicamente activa (California, E.E.U.U.). Los resultados claramente son consistentes con los de Brocher para las zonas superficiales. Esto sugiere, que de manera tentativa, mientras no se disponga datos de sísmica profunda, se utilicen las relaciones de  $V_p$  vs  $V_s$  de Brocher (2005) en las simulaciones sísmicas para la los Andes de Mérida.

## CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de las velocidades de las ondas P y S son en general más bajos que los publicados en la literatura, debido a que la adquisición fue llevada a cabo en zonas superficiales de la corteza, la cual está afectada por el fracturamiento y meteorización. Sin embargo, estos valores se adaptan a las condiciones de la zona de estudio a partir de la cual se desean construir las simulaciones sísmicas, por lo que son bastante aceptables como información de entrada en dichos modelos, por lo menos como una primera aproximación.

Es importante resaltar que los datos obtenidos en este trabajo, ofrecen, grosso modo, información superficial de la corteza terrestre. Ésta puede servir de complemento en otras investigaciones que se puedan realizar mediante sísmica profunda. Recordemos que a mayor profundidad las rocas se encuentran en mejores condiciones (menos fracturadas y más compactas) y se espera que los valores de velocidad sean significativamente más altos.

Según los resultados obtenidos los valores más altos de la  $V_p$  se determinó para las areniscas de la Frm. Aguardiente (3,49 km/s) y para la  $V_s$  en los esquistos de Asociación Tostos (1,98 km/s). Por otra parte, los valores más bajos tanto de  $V_p$  como de  $V_s$  corresponden

a los conglomerados de la Frm. Sabaneta ( $V_p$  entre 0,79 km/s y 0,87 km/s) y ( $V_s$  entre 0,47 km/s y 0,64 km/s). En la FIGURA 8 se muestran dos registros sísmicos con bloques y sin bloques para las velocidades de las ondas P en los conglomerados de la Frm. Sabaneta. Se puede observar que la pendiente de línea roja (la cual indica la primera llegada) varió muy poco en ambos registros.

Por lo que se puede decir que la metodología de los bloques es aceptable.

Mientras no se dispongan de datos de sísmica profunda, se recomienda utilizar las relaciones entre velocidades  $V_p$  y  $V_s$  presentados por Brocher (2005) como datos de entrada en modelos de simulación sísmica.

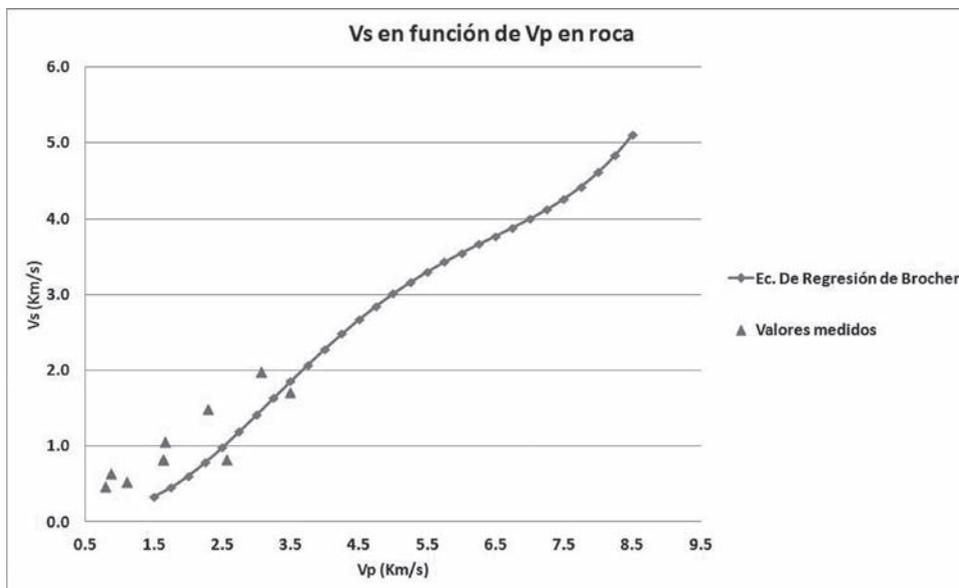


FIGURA 7. Curva de la  $V_s$  en función de  $V_p$  (km/s) según la ecuación de regresión de Brocher. Los puntos fuera de ella corresponden a los valores obtenidos en roca

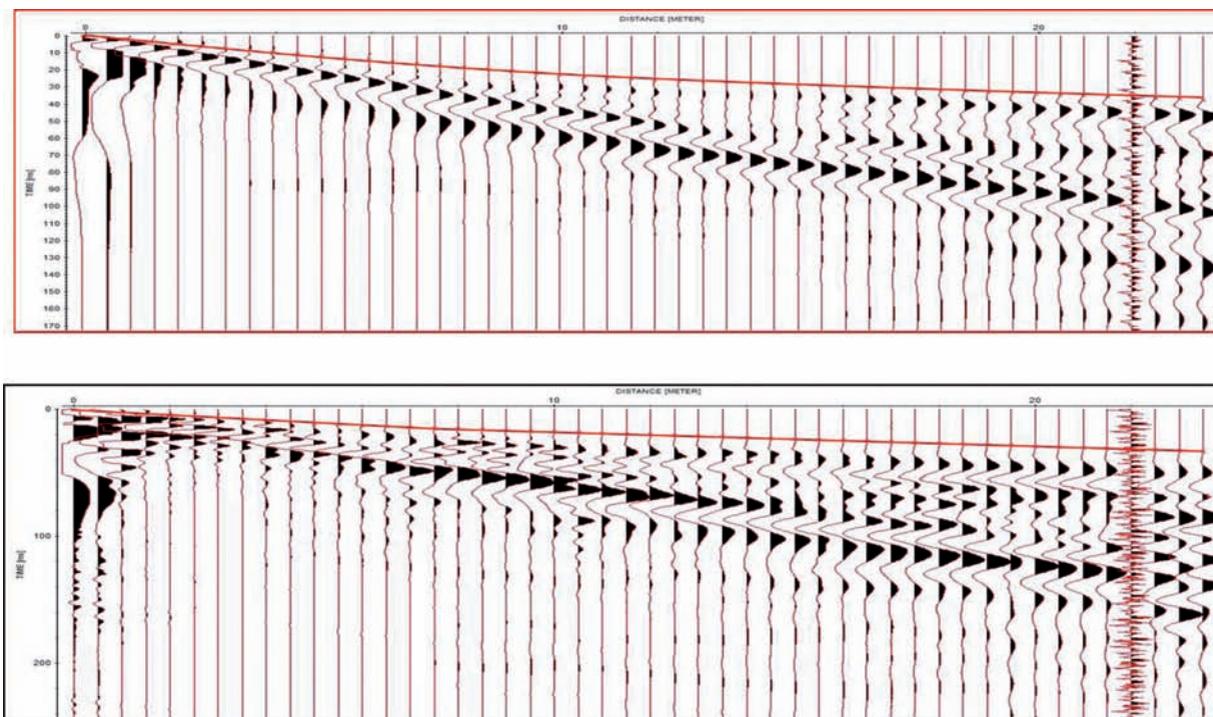


FIGURA 8. Registros sísmicos sin bloques (arriba) y con bloques (abajo) para los conglomerados de la Formación Sabaneta, ondas P. La línea roja indica la primera llegada.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por FUNVISIS a través del proyecto “Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos”, FONACIT 2007000939 Misión Ciencias; también agradecemos a FUNVISIS haber permitido el uso de la licencia del programa Reflex. A todo el personal del Laboratorio Geofísica de la Facultad Ciencias, además de los Laboratorios de Ensayos y Materiales y de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

## REFERENCIAS

- Brocher, T. 2005. Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust. Bulletin of the Seismological Society of America, 95 ( 6): 2081-2092.
- Cantos, J. 1973. Tratado de geofísica aplicada. Litoprint. Madrid, España.
- Dagert, J. 2010. Determinación de las velocidades de las ondas P y S en las zonas superficiales de unidades rocosas del área metropolitana de Mérida. Trabajo final de grado. Dep. de Física, Facultad de Ciencias ULA.
- Geometrics.1999. A Report On Land Streamers: The Last Geophone You Will Ever Plant? Disponible: <ftp://geom.geometrics.com/pub/seismic/Literature/LandStreamersv3.pdf>
- González de Vallejo, L. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall. Madrid.
- Hudson, J. 1993. Comprehensive Rock Engineering, principles, practice and projects. Vol 3: Rock Testing and Site Characterization. Pergamon Press. United Kingdom , London.
- Léxico Estratigráfico de Venezuela 1997. Tercera Edición. Disponible <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>.
- Rocabado, V., Schmitz, M., Rendón, H., Vilotte, J.P., Audemard, F., Sobiesiak, M., Ampuero, J.P, y Alvarado, L. 2006. Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del valle de Caracas. Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV. 21 (4): 81-93.
- Rodríguez-Sastre, M.A., and Calleja, L. 2006. The determination of elastic modulus of slates from ultrasonic velocity measurements. The Geological Society of London. IAEG Paper number 775: 1-11.
- Sandmeier, K.J. 2007. Reflex 4.2. Program for Processing and Interpretation of Reflection and Transmission Data. Disponible: <http://www.sandmeier-geo>.
- Schnabel, P., Lysmer, J., and Seed, H. 1972. Shake. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthq. Eng. Research Center, Rep. No. UCB/EERC-72/12. Univ. of Calif., Berkeley.
- Tromp, J. 2007. A basic introduction to quantitative seismic hazard assessment. Journal of Earthquake and Tsunami, 1 (2): 99-118.
- Zambrano, O. 2009. Determinación del modelo geofísico del subsuelo, mediante la adquisición de datos de ruido sísmico ambiental y sísmica de refracción, de la zona suroeste del área metropolitana de Mérida. Trabajo Final de Grado, Esc. de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes.

---

---

Trabajo recibido: mayo 17 de 2012  
Trabajo aceptado: agosto 22 de 2014