

## **Estudio de refracción sísmica para la caracterización geotécnica del subsuelo somero en una zona del valle de Monay, Edo. Trujillo, Venezuela**

*Antonio Ughi\*, Laboratorio de Interpretación del Subsuelo, Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela.*

**Palabras clave:** Sísmica de refracción, geotecnia, integración geológico-geofísica, Geofísica Somera.

### **Resumen**

Se realizaron 11 dispositivos sísmicos de refracción de doble disparo en una zona del valle de Monay con el propósito de caracterizar físicamente el subsuelo en un conjunto de sitios específicos. Los resultados obtenidos permitieron identificar tres estratos sísmicos principales con velocidades de onda P ( $V_p$ ) que varían en un rango de 440 a 1050 m/s para el primer estrato, 840 a 2240 m/s para el segundo estrato y 1510 a 5360 m/s para el tercer estrato.

Al correlacionar los resultados de la sísmica con los datos geológicos se interpreta que las variaciones de  $V_p$  se deben a cambios laterales en los niveles de compactación del material sedimentario por debajo de los 10 a 16 m de profundidad, estando este material constituido principalmente por areniscas infrayacentes a una capa de aluviones.

### **Introducción**

El uso de la Geofísica como herramienta para la caracterización geotécnica del subsuelo somero ha tenido un amplio desarrollo en Venezuela durante la última década. La caracterización del efecto de sitio (Cataldi et al., 2009), microzonificación sísmica (Rocabado et al., 2002), determinación de espesor de sedimentos en zonas urbanas (Sánchez et al., 2002), caracterización del suelo para construcciones civiles (Rojas y Cataldi, 2008; Ughi et al., 2008) evaluación de riesgos geológicos y de licuación de suelos (Romero et al., 2002; González y Ughi, 2006) destacan entre las muchas aplicaciones que se han realizado.

El método sísmico ha tenido la mayor preponderancia en las aplicaciones geotécnicas, ya que permite obtener muchos de los parámetros que la ingeniería civil y el diseño sismorresistente requieren para la planificación y construcción de edificaciones, es decir, determinación de espesores de sedimentos (factor fundamental en la generación de efectos de sitio), determinación de la geometría de los estratos en el subsuelo y estimación de módulos elásticos (Ughi et al., 2008), identificación de fracturas (Meza y Sánchez, 2002) entre otros.

El presente trabajo recoge los resultados de un estudio sísmico realizado por el Grupo de Geofísica Somera-UCV

en una zona del valle de Monay con el propósito de caracterizar físicamente el subsuelo en un conjunto de sitios específicos y correlacionar la información geofísica con los datos de geología de superficie y calicatas geológicas.

### **Geología y morfología del área**

El área en estudio pertenece a la provincia geomorfológica de las estribaciones y valle de Monay en donde la topografía permite diferenciar tres zonas morfológicas: los valles de Monay que ocupan una cuenca semicerrada de topografía plana, drenada por el río Monaycito, afluente del río Monay (García, 1981). Las estribaciones de Monay posee una topografía moderada de filas prominentes entre zonas suaves de antiguas terrazas con cotas que varían entre 300 y 500 m.s.n.m. Los ríos y quebradas poseen valles anchos pero cauces rectos. La Cordillera Trujillana se ubica hacia el este de las estribaciones de Monay con una topografía prominente y cotas superiores a los 2000 m.s.n.m.. Los valles de quebradas y ríos poseen forma en "V", con gran pendiente (García, 1981).

Las litologías aflorantes son las siguientes: Calizas fosilíferas grises del Cretácico intercaladas con lutitas negras y areniscas de colores claros de grano medio a grueso, duras y en partes friables. Formación Betijoque-TPEb (Figura 1) compuesta por conglomerados de peñones mal cementados, en una matriz areno – limosa en parte arcillosa, con intercalaciones de areniscas blancas, duras y capas de limos arenosos muy densos. Hacia la parte superior de la secuencia desaparecen los conglomerados y afloran capas de arcillas compactas, con intercalaciones de limolitas arcillosas (García, 1981).

Las terrazas-Qt (Figura 1) forman una topografía plana en forma de meseta y afloran circundando las filas de la Formación Betijoque. Están formadas por una secuencia intercalada de peñones y gravas en una matriz limo – arcillosa, limo – arcillo – arenosa, areno – limosa y grava arcillosa. Superficialmente la terraza tiene una capa de unos 40 cm de arena limosa con raíces, de color marrón oscuro.

Las terrazas recientes-Qtr (Figura 1) afloran al sur de la zona en las márgenes del río Monaycito. Se destacan por encima del plano aluvial y contrastan con las terrazas más

## Refracción sísmica en el valle de Monay

antiguas. Están formadas por gravas y peñones en una matriz arenosa. Los peñones están compuestos en una mayor proporción por rocas metamórficas y en menor cuantía por rocas sedimentarias.

Los aluviones-Qal (Figura 1) ocupan los valles aluviales de ríos y quebradas, están formados por gravas arenosas con peñones, arenas y lentes de limos de color gris oscuro (García, 1981).

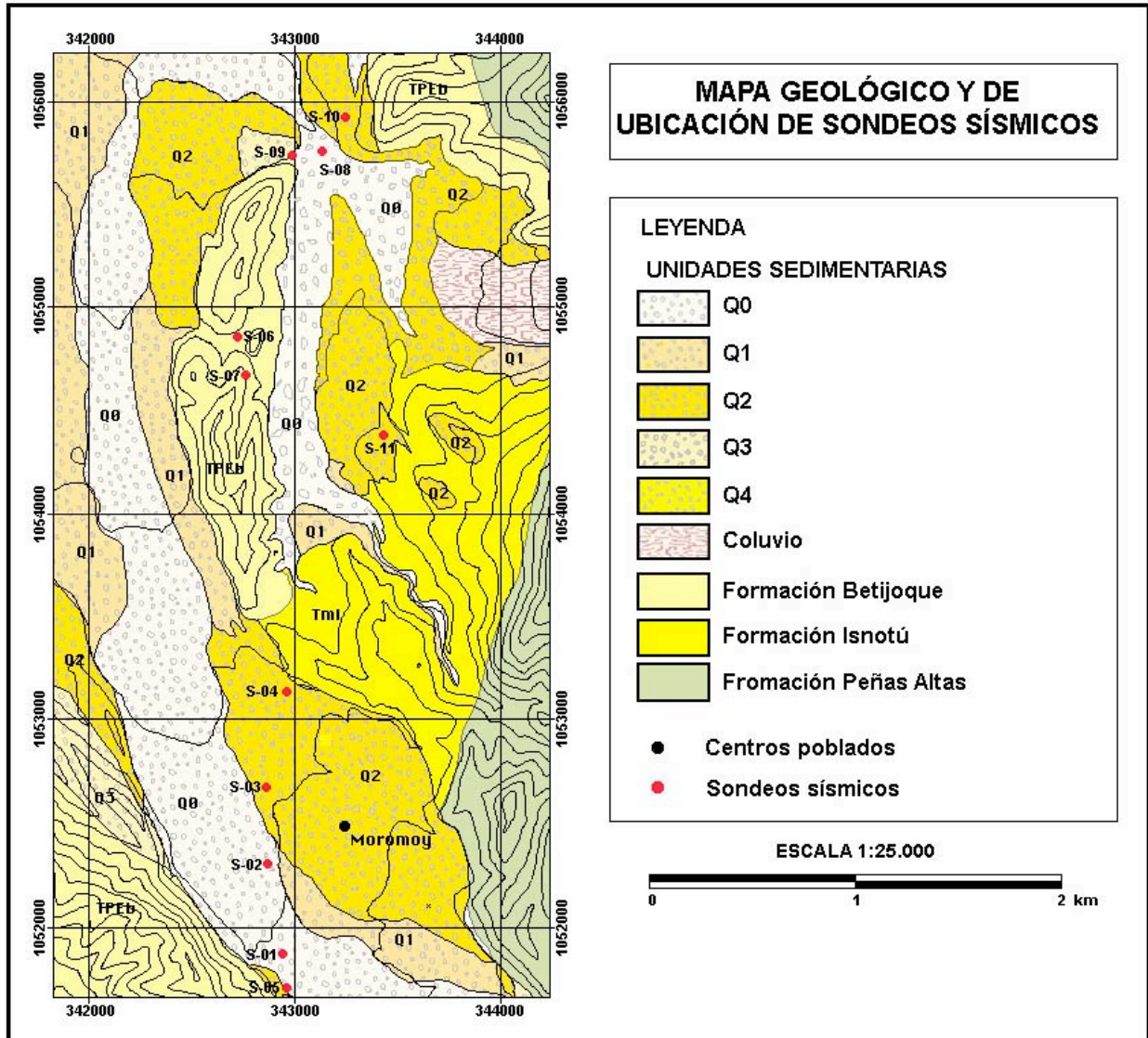


Fig. 1 Mapa geológico de la zona en estudio. Datum geodésico REGVEN, elipsoide WGS 84, proyección UTM, Huso 19. Los puntos en color rojo representan las coordenadas del punto medio de los sondeos sísmicos identificados con una numeración.

### Adquisición y procesamiento de datos

Se realizaron 11 dispositivos sísmicos de refracción de doble disparo con sistema mecánico de generación de ondas sísmicas por el impacto de mandarina (12 kg) sobre

la placa metálica mediante sistema repetitivo (10 impactos) hasta lograr el adecuado apilamiento de la señal (Figura 2).

## Refracción sísmica en el valle de Monay



Fig. 2 Generación de ondas sísmicas por impacto mecánico de mandarina sobre placa con sistema repetitivo.

Durante la adquisición se utilizaron ganancias variables para cada geófono desde 60 db. hasta 90 db. Los registros se imprimieron con longitudes de grabación de 512 ms, con un muestreo de la información analógica realizado cada 0,250 ms.

La geometría utilizada durante la adquisición sísmica fue diseñada de forma tal de garantizar que se pudieran determinar con precisión las velocidades y espesores de por lo menos los dos estratos sísmicos más superficiales. Esta condición se logró con una distancia entre el primer geófono y la fuente de 3 m y un intervalo o separación entre geófonos de 6 m (Figura 3), excepto en el sondeo S-04 donde la separación utilizada fue de 3 m.

Para la distribución espacial de los dispositivos sísmicos sobre el terreno se utilizó la metodología de muestreo, colocando los sondeos de forma dispersa pero en los lugares donde existiera suficiente información geológica para correlacionar con los datos geofísicos.

En el procesamiento y modelado de los datos sísmicos se utilizó el algoritmo de inversión tomográfica. Este algoritmo es capaz de generar un modelo del subsuelo cuando están presentes ciertas condiciones específicas, a saber: cuando la topografía del terreno donde se adquirieron los datos es abrupta o escarpada, cuando se

conoce la existencia de gradientes de velocidades de ondas sísmicas y cuando se conoce la existencia de fuertes contrastes laterales de velocidades de ondas sísmicas. Los dos últimos aspectos fueron los que condicionaron la escogencia de este tipo de algoritmo para el procesamiento de los datos, ya que la información geológica disponible hace presumir la existencia de fuertes gradientes y contrastes de velocidades tanto verticales como laterales en el área estudiada.



Fig. 3 Disposición sobre el terreno de un sondeo sísmico de refracción. La geometría utilizada es de 3 m de offset y 6 m de intervalo entre geófonos.

La secuencia de procesamiento (Figura 4) incluye extraer de los registros sísmicos las primeras llegadas de la onda P, para luego incorporar la topografía del terreno; esta información se extrajo de mapas topográficos de la zona.



Fig. 4 Secuencia utilizada para procesar los datos sísmicos.

Posteriormente se plantea un modelo inicial (teórico) de velocidades para el cual se establecieron tres estratos con dos interfaces y velocidades de 600 m/s para el primer estrato, 1800 m/s para el segundo y 2400 m/s para el tercero. Con esta información inicial, el programa realiza

## Refracción sísmica en el valle de Monay

la inversión del modelo sísmico en un proceso iterativo de inversión-ajuste-inversión hasta que los valores teóricos se equiparen a los observados, en ese punto termina el proceso de inversión y se puede construir el modelo final de capas (Figura 5).

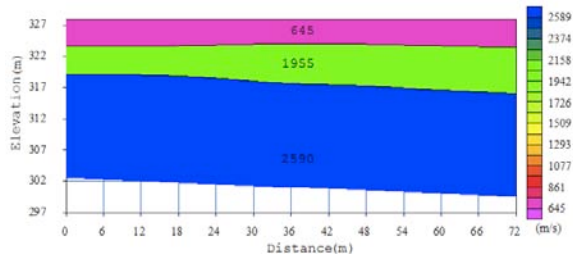


Fig. 5 Modelo de capas tipo para la zona en estudio obtenido del sondeo S-07.

### Análisis de resultados

El estudio geofísico permitió identificar tres estratos sísmicos principales para los que de forma general se pueden establecer los siguientes rangos de  $V_p$ : para el primer estrato un rango de 440 a 1050 m/s, para el segundo estrato un rango de 840 a 2240 m/s y para el tercer estrato un rango de 1510 a 5360 m/s.

El mayor valor de  $V_p$  en todo el estudio (5360 m/s) se registró en el sondeo S-02 (Figura 1), realizado sobre una terraza de unos 10 m de altitud aproximadamente sobre el nivel actual del río Monaycito, esta terraza representa una antigua llanura de inundación del citado río y resulta significativo que para el último estrato se haya registrado un valor de velocidad sísmica tan elevado. En superficie, la geología identifica estratos sedimentarios del Cuaternario lo que coincide con los valores de  $V_p$  obtenidos para los dos primeros estratos (670 y 1710 m/s respectivamente) pero por debajo de los 12 m aproximadamente la  $V_p$  se incrementa significativamente hasta valores (5360 m/s) característicos de rocas sedimentarias de alto nivel de compactación.

El estrato más superficial que se identificó con el estudio tiene un rango de  $V_p$  de 400 a 700 m/s. Estos valores de  $V_p$  son típicos de material sedimentario poco consolidado, este hecho se evidencia especialmente en los sondeos S-09 y S-10 con valores de  $V_p$  de 500 y 460 m/s respectivamente y que la información geológica sugiere la presencia de una capa de aluvión. Sin embargo, en la medida en que se incrementa la profundidad en la ubicación de estos sondeos, la  $V_p$  aumenta significativamente a valores de 1070 m/s para el segundo estrato y 2435 m/s para el tercero, lo que implica un mayor nivel de compactación en la estructura sedimentaria ahora constituida principalmente por areniscas y conglomerados.

Al sur del área estudiada, en la ubicación de los sondeos S-01 y S-05, se observa una significativa variación de las velocidades de onda P para los dos primeros estratos, ya que en S-01 se registró una  $V_p$  de 900 a 1100 m/s para el primer estrato y de 2000 a 2500 m/s para el segundo, mientras que en S-05 se registraron valores de  $V_p$  en el rango de 700 a 900 m/s (primer estrato) y 800 a 1400 m/s (segundo estrato), este hecho es significativo considerando la cercanía geográfica de ambos sondeos y se interpreta como un aumento sustancial de los niveles de compactación del material sedimentario en las áreas aledañas a la ubicación de S-01 en comparación con la zona de S-05.

Los sondeos S-06 y S-07, ubicados al norte de la zona en estudio (Figura 1) permitieron identificar estratos sedimentarios constituidos por arenas y conglomerados de alto nivel de compactación (en S-07 se registró una  $V_p=3440$  m/s en el estrato más profundo), infrayacente a una capa de 3 a 5 m de aluvión o material poco consolidado.

En los sondeos S-02 al S-04 se registraron valores de  $V_p$  en el rango de 400 a 700 m/s (primer estrato) y de 1400 a 2000 m/s (segundo estrato). Para el tercer estrato se observó una variación significativa de la  $V_p$  con 5360 m/s al sur en el S-02, 3385 m/s al norte en el S-04 y 2215 m/s al centro en el S-03.

### Conclusiones

La zona en estudio se puede caracterizar por tres estratos semiparalelos con rangos de valores de  $V_p$  de 440 a 1050 m/s para el primer estrato, 840 a 2240 m/s para el segundo y 1510 a 5360 m/s para el tercer estrato.

Los valores más bajos de  $V_p$  para el primer estrato (400 a 700 m/s) se identificaron en los aluviones (Qal) y terrazas cuaternarias (Qt). Sin embargo, en estas mismas unidades litológicas y en la Formación Betijoque (que aflora hacia la zona central del área en estudio) se determinaron altos valores de  $V_p$  para el segundo estrato (1400 a 2000 m/s).

El tercer estrato presenta la mayor variabilidad de valores de  $V_p$ , ya que en los sondeos realizados sobre los afloramientos de la Formación Betijoque los rangos varían desde 1500 a 4000 m/s, mientras que con los sondeos realizados sobre los aluviones y terrazas cuaternarias se obtuvieron valores de 1500 a 3000 m/s.

Estos resultados son interpretados como cambios laterales en los niveles de compactación del material sedimentario por debajo de los 10 a 16 m de profundidad, estando este material constituido principalmente por areniscas infrayacentes a una capa de aluviones.

## Refracción sísmica en el valle de Monay

Finalmente, la adquisición sísmica para caracterizar el subsuelo en sitios específicos mediante la técnica de muestreo ha demostrado ser una herramienta eficaz para determinar las variaciones laterales de compactación del material sedimentario, siempre que se pueda disponer de una abundante y confiable información geológica (a la misma escala de la adquisición geofísica) con la que se puedan establecer correlaciones.

### Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento al Laboratorio de Geofísica Aplicada y al Departamento de Geofísica de la UCV por haber facilitado los equipos con los que se realizó la adquisición sísmica para esta investigación.

### Referencias

- Cataldi, A., D. Pacheco y H. Rojas, 2009, Caracterización específica de sitio para instalaciones industriales de alta sensibilidad y en zonas de altos riesgos geológicos. Ejemplos en Venezuela. Memorias, IX Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas.
- García, R., 1981, Estudio geológico y de materiales de préstamo para el proyecto de la presa Piedra Azul, Informe técnico, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas. 54p.
- González, J. y A. Ughi, 2006, Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmica de refracción somera en la isla de barrera de la Laguna de Unare, Estado Anzoátegui. Memorias, XIII Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas.
- Meza, R. y J. Sánchez, 2002, Estudio geotécnico para la determinación de fracturas en diques en el área 75 de Bauxilum-CVG, operadora de alúmina. Memorias, XI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas.
- Rocabado, V., M. Schmitz, T. Enomoto, N. Abeki, V. Espinoza, P. Ghinaglia, J. Sandía y J. Suniaga, 2002, Períodos predominantes y amplificaciones relativas del suelo de Caracas. III Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 240p.
- Rojas, H. y A. Cataldi, 2008, Aplicación de métodos sísmicos de ondas superficiales y ruido ambiental en caracterización de sitio. Memorias, XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas.
- Romero, M., A. Cragno, R. Ambrosio, M. Schmitz y J. González, 2002, Caracterización de suelos con métodos geofísicos, edo. Vargas (La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena). III Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 240p.
- Sánchez, J., M. Schmitz y V. Cano, 2002, Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas como aporte para el estudio de microzonificación sísmica. III Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 240p.
- Ughi, A., V. León, J. Reyes, E. Villegas y G. Carrillo, 2008, Caracterización geotécnica del subsuelo en la región de Argyle, isla St. Vincent, Antillas Menores. Memorias, XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas.