

Experimental Assessment of Shear Wave Velocity in Boquete City, Panama, Using Refraction Microtremor Method (ReMi)

Kryсна Samudio¹, Larisa Almengor¹, Saddy Li, Eng.¹, Francisco Grajales-Saavedra, Ph.D.^{1*}
and Alexis Mojica, Ph.D.²

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama, ²Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama, kryсна.samudio@utp.ac.pa, larisa.almengor@utp.ac.pa, saddy.li@utp.ac.pa, francisco.grajales@utp.ac.pa, alexis.mojica@utp.ac.pa

Abstract– Seismic site analysis is an important step on the design of both conventional structures as well as critical infrastructure, such as water supply pipelines, sewers and roads. This article present results of an experimental investigation that used the geophysical method refraction microtremor (ReMi) for determination of shear wave velocities in soil of Boquete City, Republic fo Panama. As part of this research, a field exploration campaign was developed on which ReMi studies were carried out on six points along the David – Boquete Road. Results show that there are different stratigraphic profiles for Bajo and Alto Boquete zones, which is shown by the shear wave profiles obtained. Results of the study herein presented are fundamental in order to be able to develop seismic site characterization, which is at the same time useful for infrastructure design.

Keywords- Earthquakes, microtremors, geophysics, shear wave, Fourier

Evaluación Experimental de la Velocidad de Onda Cortante en la Ciudad de Boquete Mediante el Método de Refracción de Microtremores (ReMi)

Kryсна Samudio¹, Larisa Almengor¹, Saddy Li, Eng.¹, Francisco Grajales-Saavedra, Ph.D.^{1*} and Alexis Mojica, Ph.D.¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama, , kryсна.samudio@utp.ac.pa, larisa.almengor@utp.ac.pa, saddy.li@utp.ac.pa, francisco.grajales@utp.ac.pa, alexis.mojica@utp.ac.pa

Resumen— El análisis sísmico de sitios es un aspecto de suma importancia para el diseño tanto de estructuras convencionales como también estructuras críticas, como lo son acueductos, alcantarillados y carreteras. Este artículo presenta los resultados de una investigación experimental en la cual se utilizó el método de refracción de microtremores (ReMi por sus siglas en inglés) para determinar las velocidades de onda corte (u onda de cizalladura) en los suelos de la Ciudad de Boquete, República de Panamá. Como parte de la investigación se desarrolló una campaña de exploración de campo, en la cual se realizaron estudios ReMi en seis puntos a lo largo de la carretera David-Boquete. Los resultados muestran la existencia de distintas estratigrafías en las zonas de Bajo y Alto Boquete, lo cual se ve reflejado en los perfiles de velocidad de onda obtenidos. Los resultados del estudio aquí presentado son fundamentales para poder posteriormente realizar caracterización sísmica del sitio, la cual sea de utilidad en el diseño de infraestructura.

Palabras clave—Sismos, microtremores, geofísica, onda de corte, Fourier.

se han enfocado en la afectación en estructuras a nivel de suelo como viviendas y edificios residenciales. Sin embargo, muy pocos estudios han sido dedicados a la investigación de parámetros de diseño relevantes para infraestructuras críticas, tales como acueductos, alcantarillados, pavimentos, etc.

Debido a esto, surge la necesidad de realizar investigaciones y proyectos para recolectar datos que pueden ser aplicados de forma directa en Panamá.



Fig. 1 Actividad sísmica en Panamá ocurrida entre 1900 y 2015. [2]

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el territorio panameño ha experimentado diversos eventos sísmicos que han expuesto la vulnerabilidad del istmo ante eventos de este tipo. La actividad sísmica de Panamá, como se puede observar en la Figura 1, es considerada nivel medio en comparación con otros países de Centroamérica, sin embargo, los eventos registrados en el país generan una preocupación en la población. Uno de los casos más recientes ocurrió el 14 de marzo del 2019, el epicentro fue a 48 km al sur de la costa del Golfo de Panamá y este registró una magnitud de 4.4 y una profundidad de 26.7 km según el reporte de United States Geological Service (USGS) [1].

Uno de los sismos más importantes ocurrido en el territorio panameño tuvo lugar cerca de la zona de San Blas el 7 de septiembre de 1882, con una magnitud estimada de 7.9 – 8.0 en la escala de Richter. Este sismo provocó un tsunami durante el evento sísmico [3][4].

La vulnerabilidad sísmica en Panamá no ha sido investigada a fondo, la mayoría de los estudios realizados solo

La provincia de Chiriquí, ubicada al occidente del Istmo de Panamá (ver Fig. 1) presenta una actividad sísmica significativa, en donde han ocurrido movimientos telúricos de gran importancia (1879, 1934, 2002, 2017). Por su parte la zona montañosa de la provincia también ha presentado sismos que rodean al Volcán Barú, teniendo en cuenta que este es un volcán activo [5]. En las tierras de la provincia de Chiriquí se han registrado sismos desde 1930, algunos con bajas magnitudes, pero, de igual manera generan una alarma en la población [6].

A. Justificación

Ante el claro desafío planteado por la baja valoración del potencial de eventos geológicos y sísmicos en el diseño de infraestructuras críticas se hace imperiosa la realización de estudios que permitan realizar una caracterización de parámetros sísmicos de sitios que puedan ser vulnerables ante la ocurrencia de terremotos. Existe en Panamá evidencia tangible de los daños que pueden ocasionar estos eventos naturales en infraestructuras críticas como lo es el caso del Sismo de Limón-Changuinola (1991) el cual produjo el

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

colapso de varios sistemas de infraestructuras críticas, como lo son acueductos, carreteras, ferrocarriles, etc.

Los métodos geofísicos constituyen una herramienta importante para la realización de estudios sísmicos no invasivos. Sin embargo, la mayoría de estos requieren de sitios sin ruido ambiental, de modo que se puedan procesar señales limpias. Esto los hace ideales para la realización de estudios previos a la etapa de planificación y diseño de infraestructura. Sin embargo, limita las posibilidades de utilizarlos para determinar parámetros del suelo en sitios que ya han sido desarrollados y poblados. El método ReMi ofrece en este sentido la ventaja de que permite determinar la velocidad de onda cortante que puede ser adecuado para realizar estudios en zonas con alto tráfico, determinar parámetros del suelo que sean de utilidad para diversos propósitos como lo es la realización de estudios de vulnerabilidad sísmica de infraestructura crítica.

El estudio aquí presentado se concentra en la ciudad de Boquete, ubicada en la provincia de Chiriquí. La ciudad es de gran importancia para el turismo y la producción agrícola. Adicionalmente, ofrece una red vial y de acueductos relativamente sencillas, y está localizada en una zona de sismicidad significativa lo cual la convierte en un lugar ideal para la realización de estudios piloto que permitan evaluar la utilización del método ReMi para estos efectos

B. *Objetivo de la investigación*

El objetivo de la investigación presentada en este artículo es determinar las velocidades de viaje de onda cortante en suelos de la Ciudad de Boquete mediante estudios ReMi, el cual aprovecha el ruido ambiental como generador de ondas y que posteriormente se procesan para realizar una clasificación sísmica del sitio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. *Método de Refracción de Microtremores (ReMi)*

Es un método geofísico no-invasivo que aprovecha el “ruido ambiente”. Por lo general, el ruido ambiental es generado por el paso de vehículos, funcionamiento de maquinarias, cercanía a fuentes activas, etc. Sin embargo, en casos de que el sitio de estudio sea silencioso, se puede emplear una fuente no controlada de ubicación conocida para enriquecer la razón señal/ruido. El procesamiento de las señales de ruido implica el obtener una curva de dispersión a partir de un espectro de velocidad de fase de las ondas Rayleigh, seguido de un proceso de inversión 1D para obtener un perfil unidimensional de onda de corte (V_s) en función de la profundidad de investigación alcanzada. La profundidad de investigación dependerá de la longitud del tendido, número de geófonos, espaciamiento entre ellos, rango de frecuencias que se exciten con el ruido ambiente (y/o golpes), entre otros aspectos [7].

El método se considera dentro de la categoría de ondas sísmicas superficiales, ya que emplea el ruido ambiental y las ondas de superficie (ondas Rayleigh) para generar un perfil detallado de velocidad de onda de corte vertical (V_s) a profundidades específicas. Las ondas Rayleigh se forman en la superficie de la tierra y producen que las partículas de terreno se sacudan en forma de una elipse retrógrada, sin movimiento transversal o perpendicular. Las principales características de las ondas Rayleigh son:

1. Pueden transmitirse sobre la superficie del terreno.
2. Tienen una relación muy directa con las ondas de corte (V_s).
3. Su amplitud disminuye con la profundidad.
4. Se pueden encontrar en el ruido sísmico ambiental.

Para llevar a cabo el método de ReMi se requiere la utilización de un conjunto de sensores sísmicos o geófonos de baja frecuencia (4,5 Hz), que permitan medir el ruido ambiental. Los geófonos son distribuidos equi-espacialmente a lo largo de un determinado arreglo el cual puede ser lineal, circular, en forma de L, etc.

El método ReMi aprovecha la naturaleza dispersiva de las ondas Rayleigh. En otras palabras, a diferentes frecuencias, el tren de ondas viaja a diferentes velocidades de fase de onda superficial. Esto hace que en un suelo estratificado las ondas con frecuencias más altas viajen a poca profundidad y por ende a velocidades más bajas, mientras que las ondas con frecuencia bajas viajan a mayores profundidades y a velocidades mayores.

Es importante mencionar que como las ondas Rayleigh se encuentran acopladas a la componente vertical de las ondas de corte, esto da lugar a una curvatura de dispersión única (curva que combina la frecuencia con la velocidad de fase de las ondas Rayleigh). Se trata sobre todo de una imagen espectral de velocidad que muestra la envolvente de la energía de la onda Rayleigh, y todo esto se da lugar en el dominio de Fourier [8].

B. *Materiales*

Para llevar a cabo el estudio y recolección de datos geofísicos en la ciudad de Boquete, fue necesario la utilización de una serie de dispositivos y herramientas, las cuales se muestran en la Figura 2.

En este estudio se utilizó el equipo PASI GEA24, un sismógrafo compacto de 24 canales y que cuenta con una tarjeta de adquisición de 24 bits e interfaz USB para la unidad de cómputo portátil externa. El sismógrafo tiene la función de almacenar los datos generados en campo, es decir las vibraciones causadas por el ruido, la cual será amplificada con ayuda de los geófonos. En esta investigación, se utilizaron 24 geófonos de baja frecuencia (4,5 Hz) separados una distancia de 2 m, estos entran en contacto directo con el suelo y se encargan de amplificar y registrar los movimientos generados en la tierra, los cuales, en muchas ocasiones, son imperceptibles para el humano.

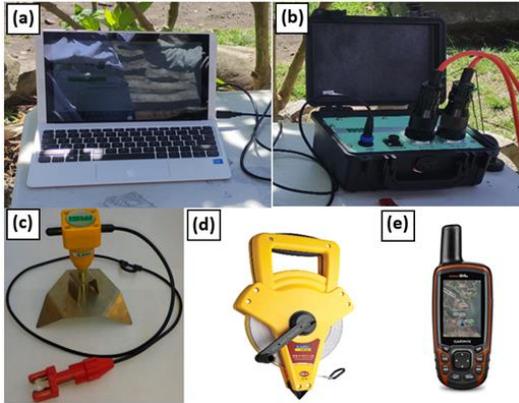


Fig. 2 Materiales utilizados en el estudio geofísico. (a) Computadora portátil, (b) sismógrafo PASI GEA24 de 24 canales, (c) geófonos de baja frecuencia – 4.5 Hz, (d) cinta métrica de topografía, (e) GPS de mano.

Además, fue necesario utilizar una cinta métrica topográfica, para medir el tendido sísmico, el cual consiste en una fila de sensores receptores y geófonos, colocados uno al lado del otro y son unidos mediante cables. Por último, se contó con un GPS topográfico con el objetivo de conocer los puntos de recolección de datos en la superficie terrestre, por medio de sistema de posicionamiento satelital.

C. Metodología de la investigación

La Figura 3, muestra la esquematización de los pasos involucrados en la metodología de la investigación.

En primera instancia, se determinó el lugar donde se llevó a cabo el estudio tomando en cuenta la longitud del tendido sísmico y la separación entre los geófonos, esto da como resultado una línea de tendido sísmico de 46 m de longitud.

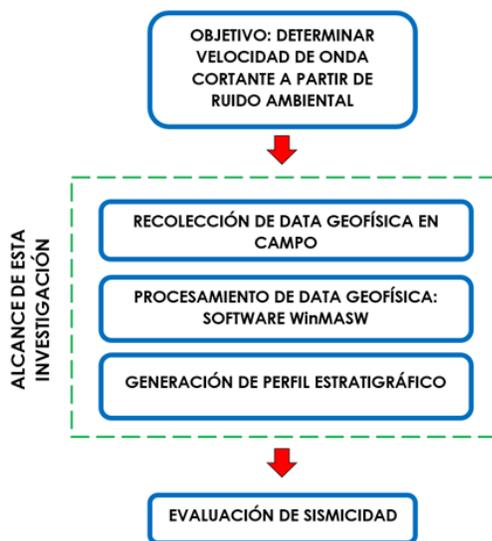


Fig. 3 Metodología de la investigación

Cada uno de los geófonos se conecta al sistema multicable con que cuenta el dispositivo y éste, al sismógrafo. (Figura 4).



Fig. 4 (a) Dispositivos empleados para la adquisición de datos y (b) proceso de instalación de geófonos.

Para el procesamiento de datos se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

1. La adquisición de 20 archivos que contengan las formas de onda de ruido ambiental de los 24 geófonos por espacio de 32 segundos para cada geófono.
2. El análisis del espectro de velocidad el cual consiste en transformar las formas de onda del ruido ambiental ya mencionadas al dominio de Fourier (velocidad de fase - frecuencia).
3. La extracción de los pares de datos de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (V_f) versus la frecuencia (f) a partir del espectro de velocidad (curva de dispersión).
4. Modelado de la velocidad de onda de corte (V_s) en función de la profundidad real del terreno a través de un proceso de inversión 1D.

III. RESULTADOS

A. Localización geográfica y geología de los puntos estudiados

La Figura 5 presenta las coordenadas de los puntos de estudios. El método ReMi requiere la existencia de ruido ambiental cerca del sitio de monitoreo. Por esta razón, los puntos escogidos se encontraban en su mayoría cercanos a carreteras, para efectos de utilizar el ruido de vehículos y maquinarias como fuente de microtemores ambientales. Los puntos ReMi-1, 2 y 3, los cuales se encontraban ubicados más al norte, pertenecen a la zona de Bajo Boquete, el cual corresponde a un valle que se encuentra la parte principal de la ciudad. Por otro lado, los puntos ReMi-4, 5 y 6 se ubican en la zona de Alto Boquete, en la salida de la ciudad.

Adicionalmente, la Figura 5 muestra la geología local del área de estudio. La región de Boquete se encuentra caracterizada por la presencia de tres formaciones distintas: Barú, Virigua y Las Lajas. Las dos primeras son suelos de origen volcánico, mientras que la tercera es de origen sedimentario.

El área de Boquete se encuentra localizada al este del volcán Barú. La formación Barú se reparte lateralmente entorno al edificio del volcán Barú. Los materiales consisten

en una matriz arenosa con muy pocos finos, en la cual se presentan también fragmentos de granulometría diversa y formas que varían desde angulosas en las proximidades al centro de emisión hasta redondeado en sitios más lejanos. Por otro lado, la formación Las Lajas contiene rocas sedimentarias del cuaternario reciente, como lo son aluviones, depósitos deltaicos, arenas, conglomerados, lutitas, depósitos orgánicos. Finalmente, la formación Virigua está constituida por un conjunto no diferenciado de rocas volcánicas, correspondientes a andesitas, basaltos, brechas, tobas, y sedimentos volcánicos.

Se puede observar que los puntos analizados se encuentran en la formación Barú (puntos ReMi-1, 5 y 6) y en la formación Las Lajas (puntos ReMi-2, 3 y 4).

B. Espectros de velocidad de fase vs frecuencia

El siguiente paso en la realización de ensayos ReMi es la obtención de los espectros de velocidad de fase versus la frecuencia, para posteriormente obtener una curva de dispersión.

La Figura 6 presenta los resultados de los espectros de velocidad de fase con respecto a la frecuencia para los seis puntos estudiados. Tal como se mencionó en la Sección 2, estos corresponden a la transformación de ondas de ruido ambiental del dominio del tiempo (espacio-tiempo) al dominio de la frecuencia (velocidad de fase-frecuencia) mediante un análisis de Fourier.

La dispersión es un fenómeno donde existe una relación directa entre dos variables. En este caso, estas son la velocidad de fase con respecto a longitud de onda; esto significa que mientras aumenta la velocidad de fase, la longitud de onda también va a aumentar [9].

Tal como se ha explicado anteriormente, las ondas superficiales Rayleigh son dependientes de la frecuencia de vibración, razón por la cual, a diferentes frecuencias, el tren de ondas viajará a distintas velocidades de fase de onda superficial. Las ondas superficiales están ligadas a las propiedades de los estratos bajo la superficie terrestre, la variación de frecuencias demuestra la variación de espesores en los estratos y, por lo tanto, también habría variación de velocidades de propagación.

A partir de los diagramas de dispersión, se puede obtener la longitud de onda máxima y, por lo tanto, la profundidad de investigación de cada uno de los puntos explorados.

En círculos indican los pares de datos de velocidad de fase de onda Rayleigh y frecuencia, los cuales serán utilizados para modelar la velocidad de corte con respecto a la profundidad.

C. Proceso de inversión para la obtención del modelo unidimensional de velocidad de onda de corte en función de la profundidad

Una vez que se realizó el procesamiento se analizó de manera separada cada conjunto de datos ReMi realizados en Boquete, y se obtuvo en cada uno la curva de dispersión a partir del modo fundamental de máxima energía (V_f vs f).

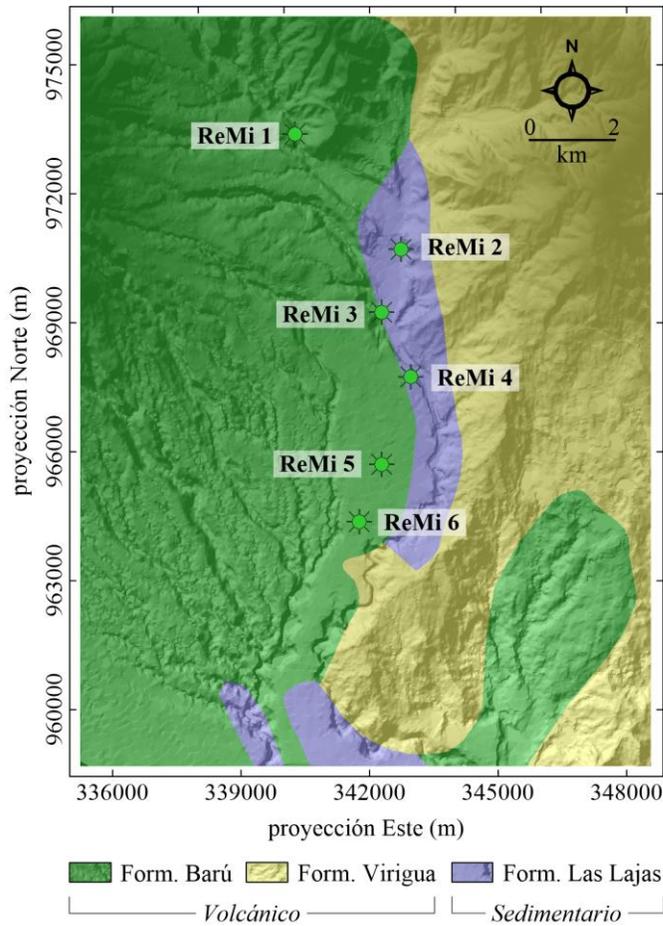


Fig. 5 Coordenadas y elevación de los puntos estudiados

El proceso de inversión se refiere al conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que se pueden utilizar para recuperar información sobre las propiedades físicas del subsuelo (susceptibilidad magnética, densidad, conductividad eléctrica, etc.) a partir de las observaciones o datos medidos en campo. En esencia, una vez obtenida la data (solución del problema), se debe generar el escenario (modelo) a partir del proceso de inversión.

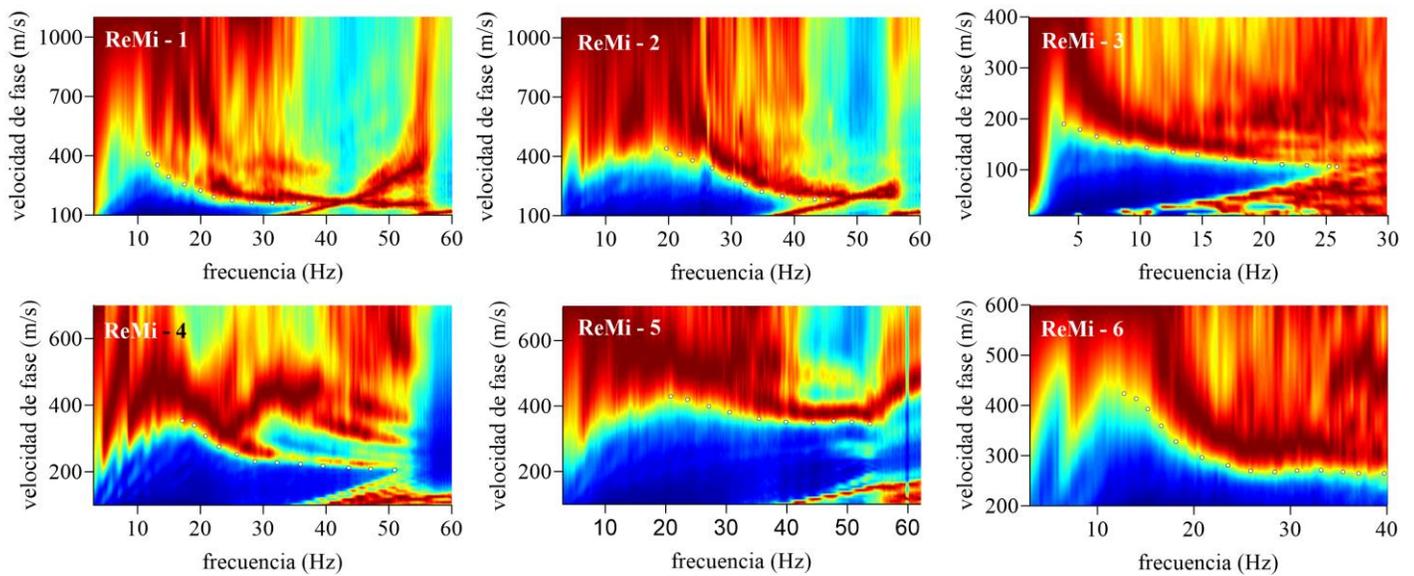


Fig. 6 Espectros de Fourier de velocidad de fase vs frecuencia y ubicación de la curva de dispersión

Empleando el software winMASW de Heliosoft, se procedió con un proceso de inversión de cada curva a través de algoritmos genéticos; la parametrización del modelo se encuentra basado en la suposición de un modelo tabular 1D que consiste en capas con características elásticas lineales y homogéneas bajo un semi-espacio; posteriormente se define el espacio de los parámetros el cual consiste en establecer rangos de velocidad de onda de corte y sus espesores. Finalmente, el programa extrae todos los perfiles V_s – profundidad con un bajo valor de discrepancia (error) entre los datos de campo y los sintéticos.

La Figura 7 muestra los perfiles de velocidad de corte para los seis puntos evaluados en Bajo Boquete. Se observa que los perfiles de velocidad de onda cortante en este sector presentan un gradiente de V_s , en donde sus magnitudes en el horizonte superficial oscilan entre 116 y 169 m/s, y con espesores que oscilan entre 2,5 y 3,4 m; por su parte los segundos horizontes presentan valores de V_s que varían entre 163 y 319 m/s, y con espesores que se extienden entre 3,1 y 7,3 m. Por su parte, para el último horizonte se alcanzan valores que oscilan entre 811 m/s y 230 m/s, y con profundidades que oscilan entre los 11,5 y 19,9 m.

Mientras tanto, la Figura 8 muestra los perfiles de velocidad obtenidos para el área de Alto Boquete. Los estratos superficiales presentan rangos de velocidad entre 237 y 408 m/s y con espesores que varían entre 1,7 y 3,4 m. Los segundos horizontes presentan valores de V_s calculados que se extienden entre 212 y 320 m/s y espesores que oscilan entre 2,4 y 3,2 m; mientras que los estratos más profundos exhiben un rango de velocidad V_s de 482 a 555 m/s, alcanzando estas últimas profundidades que van desde 9,96 y 17,0 m.

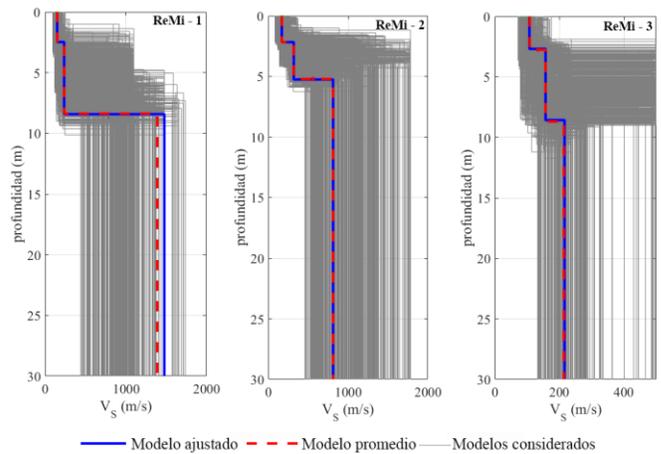


Fig. 7 Perfiles de velocidad de onda de corte para Bajo Boquete

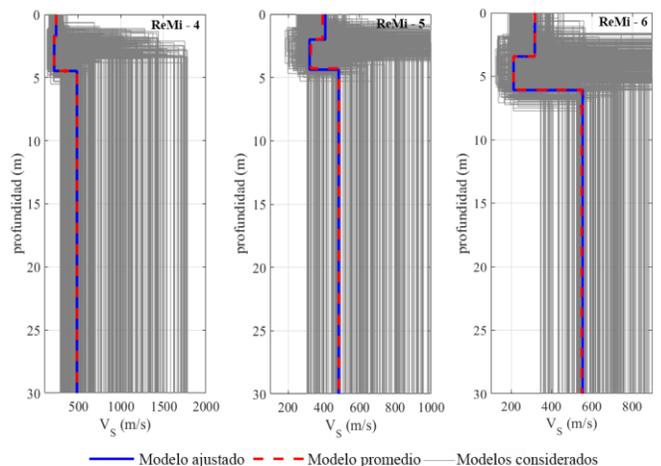


Fig. 8 Perfiles de velocidad de onda de corte para Alto Boquete

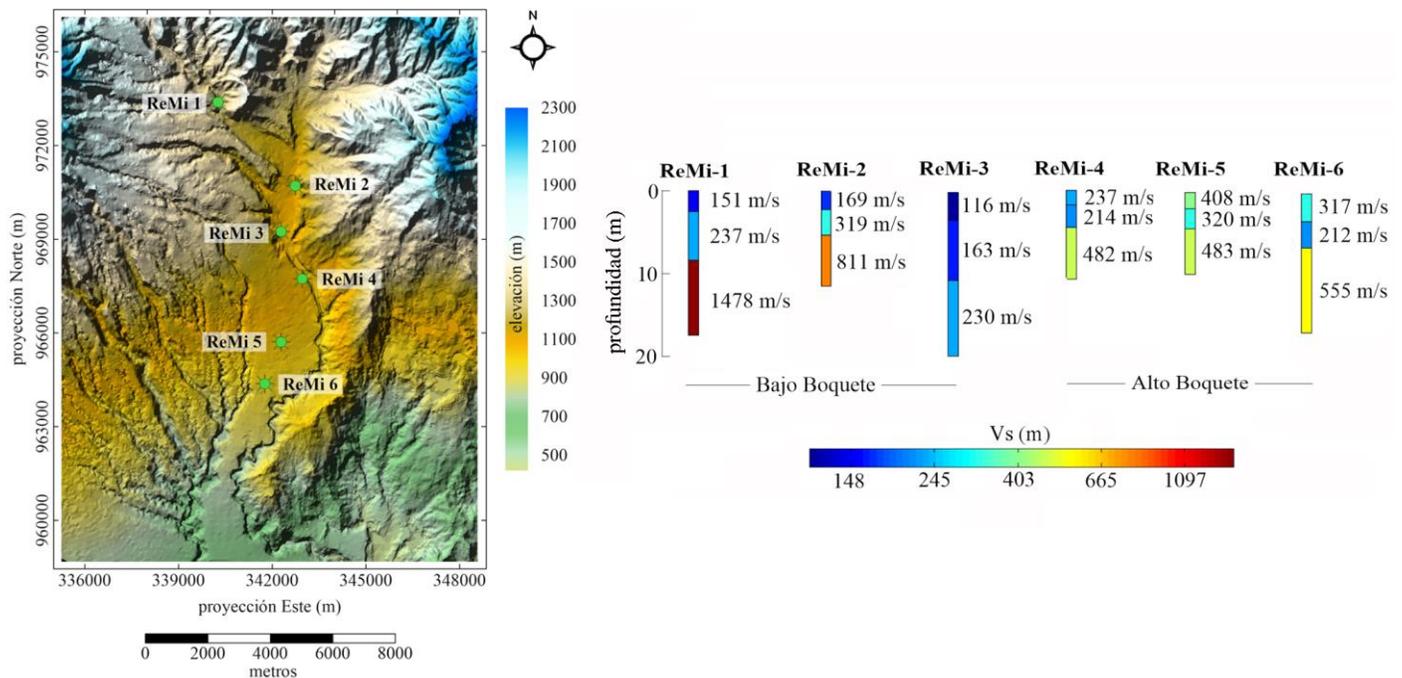


Fig. 9 Perfiles estratigráficos y topografía de Alto y Bajo Boquete. La escala vertical corresponde a la elevación de terreno.

D. Perfiles de velocidad de onda de corte

El perfil de velocidad de onda cortante de los seis puntos representados en forma de barra se muestra en la Figura 9, junto con la topografía del área de interés y alrededores. La topografía del área en estudio comprende elevaciones desde los 500 m (en tono verde) hasta los 2300 m sobre el nivel del mar (en tono azul). Los puntos seleccionados en este trabajo rondan los 900 m (en amarillo) y 1600 m de elevación.

Contiguo al mapa topográfico de Boquete, se muestran los perfiles de velocidad obtenidos mediante los ensayos ReMi con la respectiva la escala de valores de Vs. Al momento de interpretar los resultados, se debe tomar en cuenta que la elevación de la superficie de cada punto varía según su posición en el mapa topográfico. También, la proyección vertical de cada punto se debe obtener con base en los resultados de las Fig. 7 y 8, para los casos de Bajo y Alto Boquete.

Se puede observar una marcada variabilidad entre las velocidades de onda cortante determinadas para cada uno de los puntos. Siendo aquellos de Alto Boquete los que presentan velocidades de onda cortante de menor magnitud.

Una conclusión a priori de estos resultados es que las amplificaciones de sitio esperables en Alto Boquete deben ser mayores que en Bajo Boquete. Los suelos de Bajo Boquete parecieran corresponder a roca intemperizada o fracturada mientras que Alto Boquete pareciera ser suelo blando

IV. DISCUSIÓN

Los resultados presentados en este estudio corresponden a la caracterización geofísica de suelos de la ciudad de Boquete mediante el uso de la técnica de Refracción de Microtremores (ReMi). Como se ha mencionado, una de las ventajas de esta técnica es que permite la obtención de datos geofísicos a partir de ruido ambiental. Esto, la convierte en una técnica muy versátil para el monitoreo de suelos en lugares ya urbanizados.

Los espectros de Fourier, de velocidad de fase vs frecuencia, muestran la existencia de curvas de dispersión bien definidas. A partir de los diagramas de dispersión, se pudo obtener la longitud de onda máxima y, por lo tanto, la profundidad de investigación de cada uno de los puntos explorados, las cuales oscilan entre 9,96 y 19,9 m.

Las velocidades de onda cortante obtenidas en el área de Bajo Boquete (ReMi-1, ReMi-2, y ReMi-3) muestran rangos de valores que corresponden a suelos duros, principalmente después de los 5 a 10 m de profundidad.

En el caso del punto ReMi-1, el perfil de velocidades muestra una capa de 10 metros de suelo relativamente blando, seguido de una zona de suelo duro, con velocidades de 1478 m/s. Este hallazgo es consistente con el hecho de que dicho punto es parte de la formación Barú, la cual es de origen volcánico y cubre la mayor parte del edificio del volcán Barú. Una estructura basáltica podría estar asociada a este valor elevado de Vs.

Por otro lado, el punto ReMi-2 revela la existencia de suelo blando en los primeros 5,3 m de profundidad. Seguidamente se observa una velocidad de onda cortante en el rango de los 811 m/s. Esto es consistente con el hecho de que

el punto en cuestión se encuentra en la parte superior (i.e. norte) de la formación sedimentaria Las Lajas, por lo cual es natural percibir un decremento en la velocidad de onda cortante.

En cuanto a los puntos ReMi-3 y ReMi-4 (este último, ubicado en Alto Boquete), ambos se encuentran ubicados en la formación Las Lajas (sedimentaria). Este hecho es consistente con las velocidades obtenidas en los ensayos, las cuales oscilan entre los 200 m/s y los 500 m/s. Dichas velocidades son propias de suelos blandos. Tomando en cuenta lo mencionado en secciones anteriores, la formación Las Lajas esta constituida por arenas, suelos deltaicos, conglomerados, suelos orgánicos, entre otros.

Finalmente, los puntos ReMi-5 y ReMi-6 los cuales se ubican en Alto Boquete y, por su posición geográfica, debieran pertenecer a la formación Barú, muestran velocidades de onda cortante que oscilan entre 400 m/s y 600 m/s respectivamente. Estas velocidades no son del todo consistentes con la geología de la formación Barú. Era de esperar que se obtuvieran velocidades similares a las del punto ReMi-1. Sin embargo, una inspección visual de la Fig. 5 permite constatar que, si bien los puntos se localizan sobre formación Barú, también es cierto que en el área adyacente confluyen las tres formaciones geológicas, por lo cual pudiera justificarse alguna desviación de los valores esperados.

IV. CONCLUSIÓN

El presente estudio involucró la realización de análisis de refracción de microtremores (ReMi) para determinar los perfiles de velocidad de onda cortante en el área de Boquete, Provincia de Chiriquí. Las conclusiones del estudio son las siguientes:

- Los valores más bajos de V_s obtenidos en este trabajo corresponden a los horizontes superficiales compuestos por suelos coluviales, cenizas volcánicas, y suelos aluviales recientes.
- Los valores más elevados de V_s se concentran en la parte norte (Bajo Boquete) en donde se identifican ciertas estructuras de tipo basáltica, propias de la región. Los análisis ReMi-1, ReMi-2 y ReMi-3 muestran que el área Bajo Boquete muestra con una capa superficial de suelo blando, mientras que a profundidades mayores se encuentra un suelo rígido, posiblemente roca meteorizada.
- El hallazgo es congruente con la presencia de la formación Barú, la cual es predominante, específicamente para el punto ReMi-1. Los análisis ReMi-4, ReMi-5 y ReMi-6 muestran que en Alto Boquete se presenta un estrato de suelo muy blando, seguido de un estrato de suelo ligeramente más duro. Esto es consistente con la cercanía de estos a la formación Las Lajas y Virigua.
- El estudio aquí presentado se limita a calcular los valores de onda cortante mediante el método ReMi. Fases futuras de este trabajo involucran realizar una caracterización

sísmica del sitio, para lo cual es recomendable realizar perforaciones en aquellos puntos que fueron estudiados. Esto permitirá correlacionar los perfiles de velocidad de cizalladura con observaciones tangibles de la estratigrafía local.

Los resultados presentados en este artículo constituyen un avance en el estado del arte de la ingeniería sísmica, toda vez que, hoy no se han realizado investigaciones con esta metodología específica en Boquete. Es importante que las autoridades competentes en lo referente a análisis y diseño de infraestructuras críticas proporcionen sísmicos en el diseño.

AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada en este artículo fue financiada gracias a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá, a través del proyecto IOMA19-11: “Vulnerabilidad Sísmica de Redes de Agua Potable en Panamá”.

Se agradece la colaboración de los distintos estamentos de la Universidad Tecnológica de Panamá: transporte, servicios generales, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] United States Geological Service (USGS) “Earthquake Hazards Program: Latest earthquake,” 2019. [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000jfbt/executive>. G. Pevere. “Infrared Nation.” The International Journal of Infrared Design, vol. 33, pp.56-99, Jan. 1979.
- [2] United States Geological Service (USGS), “Interactive Earthquake Map,” 2019. [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000jfbt/map>
- [3] Alfaro Luis D. “Evolution of Seismic Risk Characterization in Panama and its Consequences”. [Online] Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://engineering.purdue.edu/PGS/past-events/2019/presentations/Alfaro-PGS-2019.pdf>
- [4] Alfaro Luis D. “Site Conditions for Port Development in Central Panama’s Atlantic Coast”, 2018. [Online] Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://conference-service.com/pianc-panama/documents/agenda/data/full_papers/full_paper_73.pdf
- [5] Vasquez Guardia, F. Camacho Astigarrabia, E. y Rodríguez, A. (2021) SISMOTECTÓNICA DEL OCCIDENTE DE LA PROVINCIA DE CHIRIQUÍ A PARTIR DE DATOS DE UNA RED SISMOLOGICA LOCAL, *Tecnociencia*, 23(2), pp. 72-92. Disponible en: <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/2269> (Accedido: 12junio2022).
- [6] Camacho Astigarrabia, E., (2009). Sismicidad de las Tierras Altas de Chiriquí. *Tecnociencia*, 11. 119-130.
- [7] Servicios Geológico Geodatos S.A.I.C(2010). Retrieved from: [http://www.geodatos.cl/remi.php#:~:text=La%20Refracci%C3%B3n%20de%20Microtremores%20\(ReMi,a\)](http://www.geodatos.cl/remi.php#:~:text=La%20Refracci%C3%B3n%20de%20Microtremores%20(ReMi,a)).
- [8] Dal Moro, G., Papan, M., & Gabrielli, P. (2006). Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and Marginal Posterior Probability Density estimation.
- [9] Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*, Second Edition. New York: Cambridge University Press.