








Combinando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la detección de niveles freáticos someros en el noroccidente del Istmo de Panamá

Combining the seismic refraction method and multichannel analysis of surface waves for detection of shallow water-table in the northwestern Isthmus of Panama

Alexis Mojica ^{1,2*} , Osiris Cubilla ³ , Eduardo Silva ³ , José Ladrón-De Guevara ⁴ , Alberto Ruíz ⁵ , Carlos A. Ho ¹ ,
Jaime Toral ⁶ 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro Experimental de Ingeniería, Panamá

² Sistema Nacional de Investigación (SNI), SENACYT, Panamá.

³ 3P Sociedad Ltda., Panamá.

⁴ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ciencias y Tecnología, Panamá.

⁵ Fundación INDICRI, Panamá.

⁶ Universidad Nacional Autónoma de Chiriquí, Panamá.

alexis.mojica@utp.ac.pa; osiris.cubilla.1986@gmail.com; silvasan@cwpanama.net; cheoldg.13@gmail.com; einstein40@gmail.com; carlos.ho@utp.ac.pa; jaime.toral@gmail.com

Fecha de recepción: 27 de abril de 2022; Fecha de aprobación: 6 de mayo de 2022.

***Autor de correspondencia:** Alexis Mojica (alexis.mojica@utp.ac.pa)

RESUMEN. En el año 2017, se realizaron una serie de estudios geofísicos en la comunidad de Finca 30, provincia de Bocas del Toro, noroccidente de Panamá y cuyo objetivo se focalizó en evaluar el uso combinado de los resultados obtenidos a través de la refracción sísmica (velocidad de onda P) y el análisis multicanal de ondas superficiales (velocidad de onda S) vía el cociente de Poisson para la detección de capas freáticas someras en el sitio de estudio. En esta comunidad se estableció un perfil de 30 m de longitud en donde se utilizó un sismógrafo para estudios de onda P y S, con 16 geófonos de alta frecuencia para el primero y 12 de baja frecuencia para el segundo y adicionalmente, un prototipo de inyección de corriente alterna de 400 V con un arreglo tipo Schlumberger a fin de verificar los resultados de la prospección sísmica; el procedimiento para estudios de onda P se basaron en la norma ASTM D5777-18, para el de onda S en el documento sobre el proyecto InterPACIFIC, y para el sondeo eléctrico, la norma ASTM D6431-18. El rango de valores del cociente de Poisson obtenido (0.47-0.49), y 10.7 ohm.m a una profundidad de 1.8 m sugieren la existencia de una zona saturada la cual fue corroborada a través de una perforación desarrollada en el sitio. Gracias a estos resultados, los acuíferos superficiales podrían ser aprovechados para abastecimiento de la población y para evaluar el nivel de afectación de la capacidad portante para futuros proyectos de ingeniería civil.

Palabras clave. *Análisis multicanal de ondas superficiales, Bocas del Toro, coeficiente de Poisson, nivel freático, refracción sísmica, resistividad eléctrica.*

ABSTRACT. In 2017, a series of geophysical surveys were carried out in the community of Finca 30, province of Bocas del Toro, north-western Panama and whose aim was focused on evaluating the combined use of the results obtained through seismic refraction (P-wave velocity) and multichannel analysis of surface waves (S-wave velocity) via Poisson's ratio for the detection of shallow water-table at the site. In this community, a 30-m-long profile was established where a seismograph was used for P and S wave studies, with 16 high-frequency geophones for the first and 12 low-frequency geophones for the second, and additionally, a AC electrical current injection prototype of 400 V with a Schlumberger type array in order to verify the results of the seismic survey; the procedure for P-wave studies was based on the ASTM D5777-18 standard, for the S-wave study in document of InterPACIFIC project, and for the electrical sounding, the ASTM D6431-18 standard. The range of Poisson's ratio values obtained (0.47-0.49), and 10.7 ohm.m at 1.8 m of depth suggest the existence of a saturated zone which was corroborated through a borehole developed at the

site. Thanks to these results, the shallow aquifers could be used to supply the population and to evaluate the level of affectation of the bearing capacity for future civil engineering projects.

Keywords. *Multichannel analysis of surface waves, Bocas del Toro, Poisson ratio, water-table, seismic refraction, electrical resistivity.*

1. Introducción

El desarrollo de proyectos de ingeniería civil en áreas de suelos compuestos por sedimentos no consolidados y saturados, podrían representar un riesgo significativo ya que pueden verse afectados de forma natural debido no solamente a la amplificación sísmica y licuación que experimentan al encontrarse en una región sísmicamente activa sino también por la presencia de acuíferos superficiales. Ante este tipo de escenarios, los métodos geofísicos pueden jugar un papel importante debido a la rápida adquisición de los datos en campo, la cobertura en extensión y su alto nivel de confiabilidad, así como el bajo costo que representa; hecho que se traduce en una optimización de recursos económico y humano. En estudios hidrogeológicos, los métodos eléctricos y electromagnéticos han sido los más empleados [1], [2] y en Panamá, se han desarrollado algunos proyectos que contemplan la aplicación de estas técnicas a estudios hidrogeológicos e hidrológicos [3-10]; sin embargo, los métodos sísmicos no han sido ampliamente utilizados en este tipo de estudios.

En muchos casos, el uso independiente de la refracción sísmica para la obtención de modelos de terreno en base a las velocidades de onda de compresión u ondas P (V_p), y del análisis multicanal de ondas superficiales MASW para obtener modelos de terreno en función de las velocidades de las ondas de cizalla u ondas S (V_s), no conllevan a un amplio conocimiento de los parámetros que definen un entorno hidrogeológico dado; no obstante, el análisis de las razones V_p/V_s y Poisson, podrían ser clave para la detección del nivel freático de acuíferos superficiales [11], [12], [13].

El objetivo de este trabajo se centra en aplicar por primera vez esta nueva técnica de métodos combinados a fin de detectar el nivel freático en un área ubicada al sureste de la ciudad de Changuinola, provincia de Bocas del Toro. Para esto, se utilizarán los resultados de los procesos de inversión correspondiente al análisis de los tiempos de llegada de las ondas refractadas y directas

empleando el time-term inversion method, y la inversión de la curva de dispersión de velocidad de fase de las ondas superficiales a través del algoritmo neighborhood; de forma paralela, un sondeo eléctrico fue realizado en el sitio de interés.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del sitio de interés

El sector noroccidental del Istmo de Panamá (específicamente en la provincia de Bocas del Toro) se caracteriza por presentar desde finales del siglo antepasado, una alta inversión y desarrollo de la productividad agrícola bananera y gran parte de las comunidades circundantes a estas zonas se construyeron sobre rellenos constituidos por sedimentos, específicamente por limo.

Además, la existencia de acuíferos superficiales en estas zonas constituye un factor natural que podría afectar la capacidad portante de este tipo de suelos para futuros proyectos de ingeniería civil. Las características físicas del suelo y la fácil accesibilidad al sitio fueron factores que influyeron en el desarrollo de este trabajo. Un mapa de ubicación del sitio de estudio se presenta en la Figura 1, con coordenadas 328,908mE y 1,042,979mN.

2.2. Aspectos geológicos

A pesar de que la zona de estudio se ubica dentro de la Formación Almirante Lajas, la cual domina los sectores de media montaña y el litoral costero, sobre yace a formaciones sedimentarias Gatún Uscari, en complemento con algunos cuerpos intrusivos de la formación Guayabito sobre la cordillera esta zona costera, la zona se caracteriza por presentar aluviones, sedimentos no-consolidados, areniscas, corales, manglares, conglomerados, lutitas carbonosas, deposiciones tipo delta, propios de la Formación Las Lajas, del período Cuaternario (ver la Figura 1) además

de ser zona de influencia y depósito de material eruptivo reciente del cercano volcán Barú.

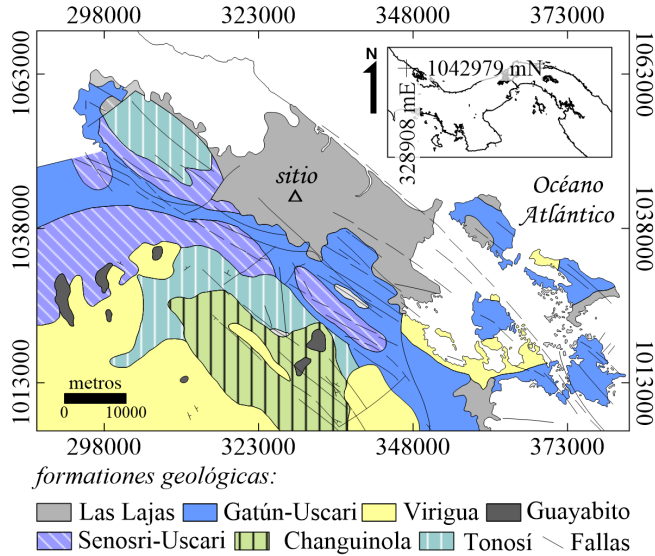


Figura 1. Ubicación geográfica del sector de Finca 30 en el mapa geológico y alrededores, provincia de Bocas del Toro.

Fuente: Dirección Nacional de Recursos Minerales [14].

Otro elemento importante en la geología es la presencia de grandes fallas regionales de corrimiento que afectan la superficie con una extensión Noroeste y buzamientos predominantes hacia el Noreste producto de las tensiones que ejerce la placa del Caribe en el desarrollo del grabben Centroamericano del cual forma parte.

2.3. Información estratigráfica del sitio

En la Figura 2(a) se presenta una imagen aérea de la zona bajo estudio con el perfil de 30m en donde se desarrollaron todas las pruebas geofísicas (dirección Noroeste-Sureste). Por su parte, la Figura 2(b) muestra la descripción estratigráfica en el centro del perfil establecido. Un conjunto de muestras fue tomado de esta perforación para su posterior análisis de laboratorio. Los resultados mostraron dos horizontes: el primero correspondiente a un limo elástico de plasticidad media, pH neutro y consistencia medianamente firme hasta una profundidad de 2.10m, seguido de un segundo horizonte compuesto por un limo gris oscuro, caracterizado por presentar un elevado contenido de humedad, baja plasticidad, pH neutro y consistencia medianamente firme. La perforación concluyó a la profundidad de 6m,

y durante la jornada geofísica el nivel freático se detectó a una profundidad de 1.80m.

Por otro lado, los ensayos de humedad natural del suelo presentan un incremento porcentual para las muestras obtenidas entre 0 y 0.6m (46.12%), para las muestras obtenidas entre 1.5 y 2.1m de profundidad, la humedad natural del suelo aumentó a 48.46%. Las muestras obtenidas entre las profundidades de 3.0 y 3.6m presentaron por su parte una disminución en el valor de este parámetro (45.41%) y finalmente, para el conjunto de muestras obtenidas entre 4.5 y 5.1m, la humedad natural reportada fue de 46.12%. La Figura 2(c) presenta un gráfico sobre este resultado.

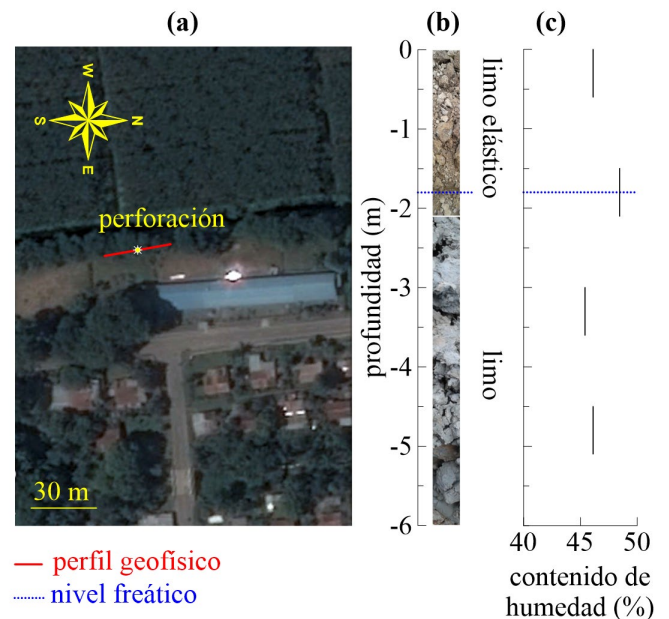


Figura 2. (a) Imagen aérea de la zona de interés y el perfil establecido, (b) detalle estratigráfico de la perforación desarrollada cercano al centro del perfil y (c) contenido natural de humedad de las muestras obtenidas en dicha perforación.

Fuente: Imagen aérea tomada de Google Earth.

2.4. Estrategia de adquisición

2.4.1. El sondeo eléctrico – inversión 1D

La configuración electródica tipo Schlumberger ha sido empleada en diversas investigaciones relacionadas con la caracterización estratigráfica y la búsqueda de fuentes de aguas subterráneas [14], [15], [16]. Para el sondeo eléctrico desarrollado en el punto central del perfil en el área de estudio, se empleó un prototipo de inyección de corriente alterna; los valores de resistividad eléctrica aparente se obtuvieron a través de la medición de los voltajes registrados, de la intensidad de la corriente

inyectada y la geometría del arreglo electródico empleado. Un total de 10 pares de datos (resistividad eléctrica aparente-distancia $AB/2$) fueron obtenidos para dos diferentes separaciones $MN/2$. La Figura 3(a) presenta la distribución de los electrodos de corriente y voltaje para la separación electródica $MN/2 = 0.3m$ (arriba) y $MN/2 = 1.0m$ (abajo), ubicándose el punto central del sondeo cercano a la perforación. Del total de datos medidos en campo, 9 fueron sometidos al proceso de inversión ya que para la distancia $AB/2 = 4m$, se registró el voltaje para las posiciones $MN/2 = 0.3m$ y $1.0m$.

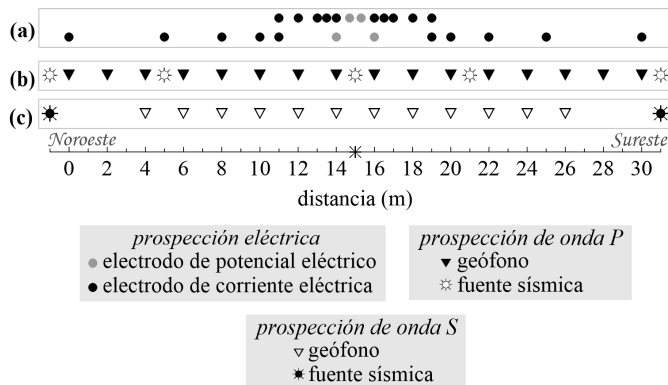


Figura 3. Bosquejo de la configuración geométrica para la adquisición de datos de (a) resistividad eléctrica y sísmicos para estudios de onda (b) P y (c) S. En la posición 15m se encuentra la perforación.

Los datos fueron invertidos empleado el software IX1D de Interpex y cuyo código de inversión está basado en el método Ridge Regression [17], [18]; su estimador interpreta las curvas de resistividad eléctrica aparente para modelos de terreno horizontalmente estratificados, considerando una pequeña cantidad de eigenvalores contenidos en el esquema de inversión y compuestos por las matrices Jacobiana e identidad.

2.4.2. Prospección de onda P – refracción sísmica

Un total de 16 geófonos de 14Hz fueron separados 2m entre ellos obteniéndose una longitud total de perfil de 30m tal como lo muestra la Figura 3(b), en donde las posiciones del primer y último geófono fueron de 0 y 30m, respectivamente.

Estos geófonos se interconectaron a un sismógrafo tipo ES-3000 de Geometrics Inc. a través de un sistema multi-cable, los cuales fueron empleados también para los estudios de onda S; por su parte las ondas sísmicas fueron generadas a través de 5 golpes de un mazo de 20lb sobre

una placa metálica ubicada en un determinado punto a lo largo del perfil. El incremento en el número de golpes en un punto dado aumenta la razón señal/ruido; un total de 5 puntos de impacto fueron establecidos a lo largo del perfil tal como lo muestra la Figura 3(b).

El sistema fue configurado para: (a) una duración temporal de las trazas sísmicas de 250ms, (b) 50ms de pre-evento (delay) y (c) un intervalo de muestreo de 0.250ms. La Figura 4 ilustra las 16 trazas sísmicas obtenidas para cada uno de los 5 shot point establecidos en el perfil bajo estudio.

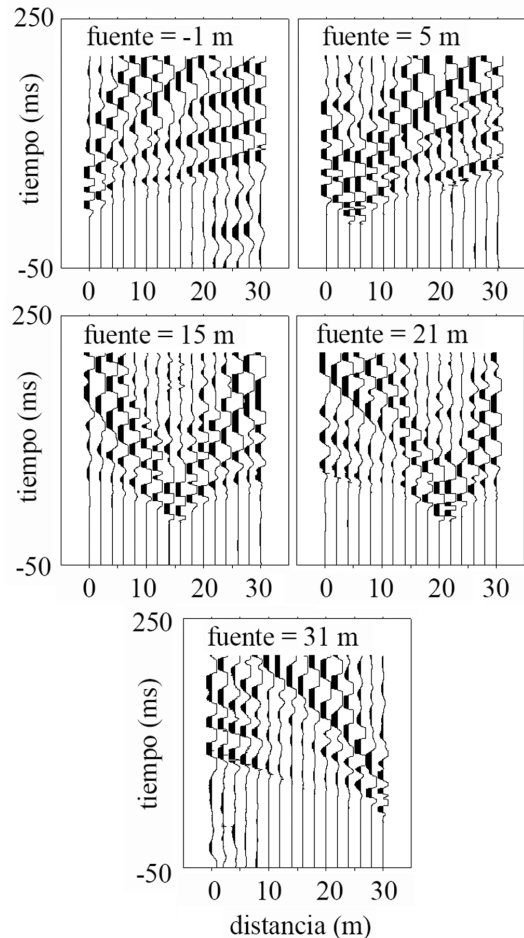


Figura 4. Sismogramas registrados por los geófonos de 14Hz y obtenidos para los 5 shot points o fuentes establecidas a lo largo del perfil.

La secuencia del procesamiento de estas señales de refracción sísmica consistió en la determinación del tiempo de llegada de las ondas P a cada geófono; para esto, se empleó el módulo Pickwin de SeisImager2D (Geometrics). Seguidamente se empleó el módulo

Plotrefa para definir las dromocronas y luego obtener un modelo 2D de terreno a través de un proceso de inversión basado en el método time-term inversión [19]. Este es un método simple de inversión de tiempos de trayecto de una onda sísmica, el cual fue desarrollado por [20].

2.4.3. Prospección de onda S – (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales 1D o MASW-1D)

Sobre el mismo perfil, se utilizaron 12 geófonos de 4.5Hz los cuales se separaron 2m entre ellos, obteniéndose una longitud del arreglo de 22m; las posiciones del primer y último geófono fueron 4 y 26m, respectivamente. Un total de dos puntos de impacto se establecieron en los extremos de dicho perfil (-1 m y 31 m). La configuración del sistema consistió en establecer: (a) una extensión temporal de los registros de 1000ms, (b) un intervalo de muestreo de 0.5ms y (c) un total de 5 golpes en cada punto de impacto de forma análoga a la prueba precedente.

La Figura 3(c) presenta la distribución de los geófonos y puntos de impacto para el desarrollo de esta prueba MASW. La Figura 5 muestra las 12 trazas sísmicas obtenidas para cada uno de los puntos de impacto sobre el perfil dado. El análisis multi-canal de ondas superficiales se basa en el estudio de la propiedad de dispersión de las ondas Rayleigh en las trazas sísmicas obtenidas y de ahí, la posibilidad de determinar un perfil de velocidad de onda S en función de la profundidad.

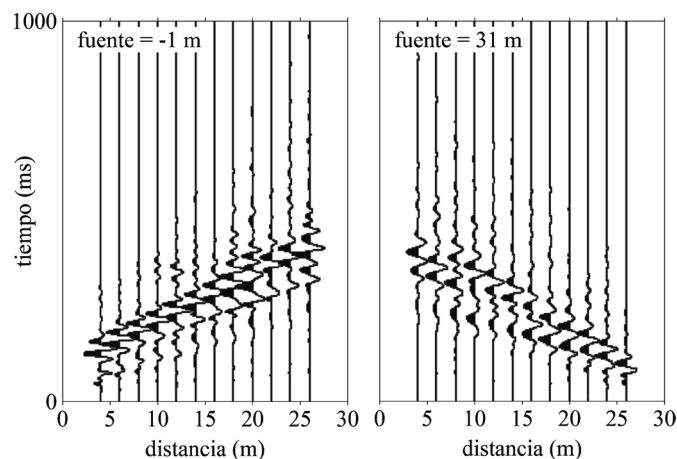


Figura 5. Sismogramas registrados por los geófonos de 4.5Hz y obtenidos para los 2 shot points o fuentes establecidas a lo largo del perfil.

Las ondas sísmicas de baja frecuencia pueden llegar a agitar la columna de suelo de mayor espesor cercana a la superficie, hecho que permite determinar la velocidad de

fase de las ondas Rayleigh a diferentes frecuencias, lo que conlleva a la generación de un espectro de velocidad de fase del cual se extrae una curva de dispersión.

Tomando en cuenta que el centro del arreglo de los geófonos ubicados a lo largo del perfil corresponderá a la posición del sondeo sísmico, se procedió con la extracción de la curva de dispersión normalizando la amplitud del espectro para cada frecuencia dada y para cada uno de los dos puntos de impacto establecidos; posteriormente, se apilaron los dos espectros de dispersión normalizados y se procedió en identificar los puntos de la curva correspondiente al modo fundamental. Este primer procesamiento se realizó a través del programa de código abierto Geopsy para pruebas de fuente activa (MASW-1D).

En este mismo punto, la selección de la frecuencia mínima en el espectro apilado depende tanto de la longitud máxima del arreglo de geófonos (L) como de la longitud de onda máxima. [21] y [22] recomiendan que esta longitud de onda máxima debe ser inferior a L debido al efecto de campo cercano y la sobreestimación del valor de la velocidad a baja frecuencia. En este estudio, la frecuencia mínima obtenida fue de 11.6Hz la cual se encuentra asociada con una longitud máxima de 10.6m. De acuerdo con [21] la profundidad de investigación corresponde a la mitad del valor de la longitud de onda máxima ($\lambda_{max}/2 = 5.3m$). Por otro lado, la frecuencia máxima depende del efecto aliasing o distorsiones que se presentan en el espectro de dispersión normalizado. Para este estudio, dicha frecuencia fue de 24.4Hz.

La inversión del conjunto de datos de velocidad de fase de las ondas Rayleigh vs la frecuencia se desarrolló empleando el algoritmo neighborhood el cual fue desarrollado por [23] y emplea los constructores geométricos o celdas de Voronoi para derivar la búsqueda en el espacio de los parámetros; dicho algoritmo fue adaptado por [24] y [25] a estudios subsuperficiales a través de la herramienta Dinver incorporado en Geopsy.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultado de la inversión eléctrica 1D

Para este primer ensayo geofísico, las observaciones o datos de campo (valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo) y la respuesta del modelo (valores de resistividad eléctrica aparente calculados) se presentan en el gráfico log-log de la Figura 6(a).

Como puede observarse en el gráfico bilogarítmico, la respuesta del modelo se ajusta a los datos de campo al establecer un total de 2 capas; la resolución del problema inverso 1D dio por resultado el modelo unidimensional que se presenta en la Figura 6(b) en conjunto con los modelos equivalentes, obteniéndose un error RMS de 2.73%. La primera capa se encuentra caracterizada por presentar un valor de resistividad eléctrica calculada igual a 37.9ohm.m y un espesor de 1.7m, mientras que el segundo horizonte presenta una resistividad más baja (10.7ohm.m); como puede observarse, el contraste existente entre ambos horizontes se aproxima al nivel freático detectado durante la jornada de trabajo (1.8m).

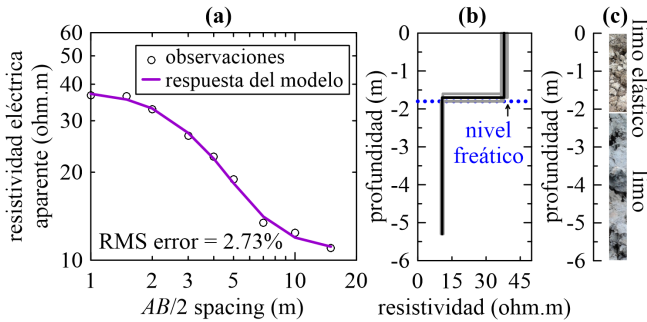


Figura 6. (a) Gráfico bilogarítmico de las observaciones o datos de campo, respuesta del modelo o datos de campo sintéticos versus el espaciamento medio (AB/2) entre los electrodos de corriente eléctrica, (b) modelo de terreno obtenido posterior a la resolución del problema inverso (línea negra continua) con 6 modelos equivalentes (líneas continuas en tono gris), e (c) información estratigráfica del sitio de interés.

3.2. Resultado de prospección de onda P

La Figura 7(a) muestra las curvas de tiempos de llegada en función de la distancia para todos los 5 puntos de impacto establecidos a lo largo del perfil, mientras que la Figura 7(b) muestra el modelo de capas del terreno obtenido mediante la resolución del problema inverso. El error RMS en la inversión de la matriz obtenido para esta prueba fue de 1.82ms.

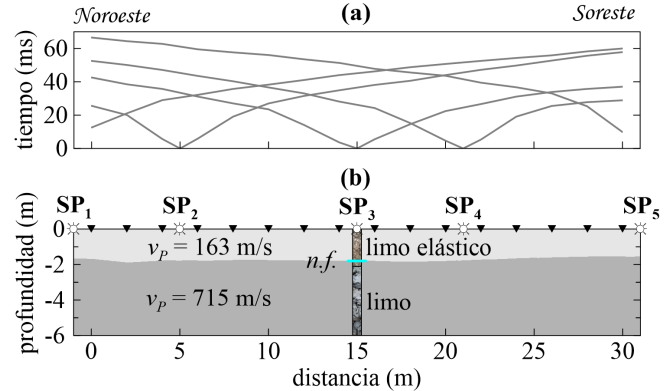


Figura 7. (a) Curvas de tiempo de arribo de las ondas refractas y (b) modelo 2D de terreno obtenido con el método de inversión del tiempo de recorrido, n.f. corresponde al nivel freático.

Un análisis de los resultados obtenidos en la Figura 7(a) sugieren la presencia de dos capas: un horizonte superficial de un espesor que varía entre 1.9 y 1.5m, y con una velocidad de onda P calculada de 163m/s, seguido de un horizonte caracterizado por presentar un valor de velocidad de onda P calculado de 715m/s. En la posición 15m a lo largo del perfil, muy cercano a la perforación, el horizonte superficial presentó un espesor de 1.8m (ver Figura 7(b)).

3.3. Resultado de prospección de onda S

El proceso de apilamiento de los espectros de dispersión normalizados obtenidos a partir de los puntos de impactos desarrollados en las posiciones -1m y 31m (Figura 8(a)), se presenta en la Figura 8(b). La inversión 1D de la curva de dispersión extraída de la Figura 8(b) se ilustra a través de la línea negra continua de la Figura 8(c) la cual representa el menor valor de discrepancia (0.0118) de los 2550 modelos calculados. Dicho modelo presenta 2 horizontes: el superficial de 3.15m de espesor y de 85m/s de velocidad de onda S calculada, seguido por un horizonte de mayor velocidad (177m/s). La profundidad de investigación (DOI) obtenida en esta prueba fue de 5.3m, tal como se mencionó con anterioridad.

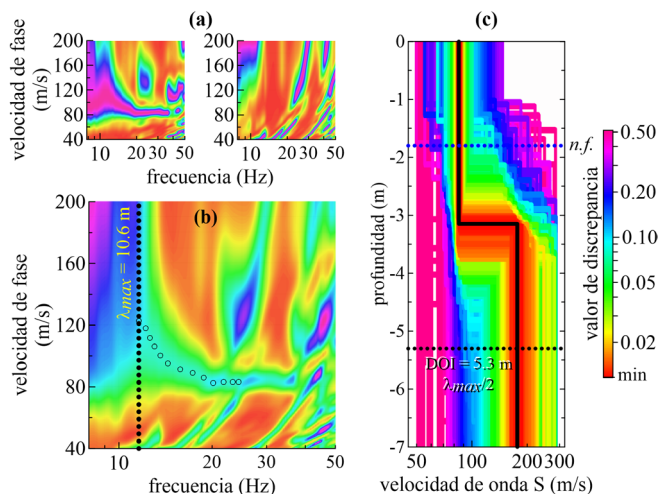


Figura 8. (a) Espectros de dispersión normalizados obtenidos en los puntos de impacto establecidos en las posiciones -1.0m y 31.0m. (b) Espectro y curva de dispersión obtenidos a partir del apilamiento de los dos puntos de impacto, y (c) resultado de la inversión 1D de los datos de velocidad de fase vs frecuencia extraídos de la Figura 8(a) empleando el algoritmo neighborhood implementado por [24] en el programa Geopsy. DOI corresponde a la profundidad de investigación y *n.f.*, el nivel freático.

Con los modelos 1D de velocidad de las ondas P y S en la posición 15m, se procedió en calcular los valores de la razón de Poisson en función de la profundidad para un DOI de 5.3m. La Figura 9(a) presenta ambos modelos 1D desplegados en un mismo gráfico.

Para la prospección de onda P, el primer horizonte de velocidad calculada de 163m/s se encuentra asociado al limo elástico de plasticidad media identificado en la perforación, mientras que el segundo horizonte con velocidad de 715m/s se asocia con un limo de plasticidad baja. Como se mencionó antes, el nivel freático se correlaciona bien con el resultado de esta prueba; a partir de 1.80m de profundidad, la velocidad de onda P se mantiene constante hasta los 5.3m.

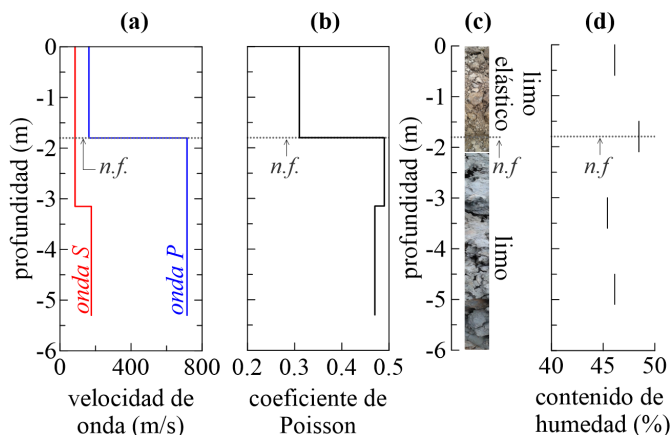


Figura 9. (a) Modelos 1D de velocidad de onda P extraído del perfil de refracción sísmica de la Figura 7(b) y de velocidad de onda S obtenido en la Figura 8(b); (b) razón de Poisson computada a partir de los modelos 1D de onda P y S; (c) información estratigráfica del sitio y (d) contenido natural de agua; *n.f.* corresponde al nivel freático.

Por su parte, el resultado obtenido en el análisis multicanal de ondas superficiales (1D) no presenta una correlación muy significativa entre el límite de los dos horizontes identificados en esta prueba (3.15m de profundidad) y el nivel freático (1.80m); sin embargo, el primer horizonte de velocidad de onda S de 85m/s se asocia con el limo elástico de plasticidad media, y el segundo de 177m/s, al limo de plasticidad baja. Para el coeficiente de Poisson (Figura 9(b)) se presentan 3 horizontes: con un valor de 0.31 y un espesor de 1.8m para el horizonte superficial; este es un típico valor que de acuerdo con [26] y [27] corresponde a sedimentos no consolidados y no saturados, el cual es el caso del limo elástico de plasticidad media identificada en la perforación.

Entre 1.8m y 3.15m de profundidad se presenta un segundo horizonte con un valor del coeficiente de Poisson igual a 0.49, el cual es típico de los sedimentos saturados ([28], [29], [30], [31]) y corresponde al limo de plasticidad baja. El límite entre estos dos horizontes se asocia con el nivel freático identificado en la perforación. El tercer horizonte posee un valor de coeficiente de Poisson cercano al identificado en el horizonte precedente (0.47), por lo que se asocia al mismo tipo de limo de baja plasticidad, pero con un menor nivel de saturación.

4. Conclusiones

En la actualidad, los métodos sísmicos no han sido extensamente utilizados en estudios hidrogeológicos en

comparación con los métodos geoelectrónicos y electromagnéticos; como método de verificación de los límites de saturación del suelo, el sondeo eléctrico mostró una buena correlación entre el nivel freático reportado y el límite estratigráfico de los limos identificados en la perforación. Por su parte, la combinación de perfiles de velocidad de onda P y S a través del cálculo de la razón de Poisson, podría jugar un rol importante en la detección de los niveles freáticos en los suelos sedimentarios, y no solamente a nivel de detección de los límites de los diferentes estratos sino también a la extensión del tamaño ya que los estratos saturados se caracterizan por presentar valores cercanos al límite de 0.50. En el área de interés, el análisis de refracción sísmica presentó una buena correlación con: el resultado del sondeo eléctrico, el nivel freático y una diferencia aceptable de 30cm con el límite estratigráfico entre ambos limos; sin embargo, el modelo 1D obtenido a través del análisis multicanal de ondas superficiales presentó discrepancias con el resultado del sondeo eléctrico, la lectura del nivel freático y con el límite estratigráfico. El cálculo del coeficiente de Poisson obtenido en el área de estudio permitió detectar el nivel freático a la profundidad reportada y por la magnitud (0.49), y manteniéndose casi constante (con una leve diferencia de 0.02) hasta 3.15m y luego hasta el máximo de profundidad alcanzado en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Tecnológica de Panamá y a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) a través del SNI, por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A.M.: medición de parámetros geofísicos en campo, análisis e interpretación de los datos geofísicos, redacción del artículo. O.C.: medición de parámetros geofísicos en campo, análisis de las muestras de suelo obtenidas en la perforación. E.S.: coordinación de la perforación y el análisis de las muestras obtenidas en la

misma. J.L.G.: redacción parcial y revisión del manuscrito. A.R.: análisis del contexto geológico del área de estudio. C.H.: configuración y análisis de los datos de onda S. J.T.: estudio del contexto geológico y tectónico de la zona de interés y revisión del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] S.S. Hubbard y Y. Rubin. "Introduction to Hydrogeophysics", en: Hydrogeophysics (Eds. Y. Rubin y S.S. Hubbard), Holanda: Springer, pp. 3-22. 2005
- [2] S.S. Hubbard y N. Linde. "Hydrogeophysics". *Treatise on Water Science*, vol. 2, pp. 401-434. 2011
- [3] A. Mojica A. "Geoelectrical Sounding and Imaging over the Central Zone of Panama", en: Geophysics (Ed. A. Okiwelu), Londres: IntechOpen, pp. 136-147. 2018
- [4] A. Mojica, I. Díaz, C.A. Ho, F. Ogden, R. Pinzón, J. Fábrega, D. Vega y J. Hendrickx. "Study of seasonal rainfall infiltration via time – lapse surface electrical resistivity tomography. A case study of Gamboa area, Panama Canal Watershed", *Air, Soil and Water Research Journal*, vol. 6, pp. 131-139. 2013
- [5] F. Ogden, A. Mojica, E. Kempema, J. Briceño y J. Regina. "Diagnosing Hydrologic Flow Paths in Forest and Pasture Land Uses within the Panama Canal Watershed Using Simulated Rainfall and Electrical Resistivity Tomography", en AGU Fall Meeting Suppl., San Francisco, California, 2014
- [6] E. Kempema, A. Mojica, G. Litt, F. Ogden y A. Carey, A. "Effect of forest age on rainwater infiltration in the lowlands humid tropics", en AGU Fall Meeting Suppl., San Francisco, California, 2015
- [7] M. Castrellón, J. Fábrega, L. Foglia, A. Mojica, A. Ruíz y S. Saavedra. "Groundwater model of a fractured rock system as a tool for groundwater management: The Estibaná Sub-Catchment, Azuero Peninsula, Panama", en E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, Panama, 2019
- [8] G. Litt, F. Ogden, A. Mojica, E. Kempema, C. Gardner, J. Regina, J. Bruce, J. Harrison, J. Hendrickx, M. Bretfeld, Y. Cheng, R. Stallard, J. Hall y W. Lyons. "Land Cover Effects on Soil Infiltration Capacity Measured Using Plot Scale Rainfall Simulation in Steep Tropical Lowlands of Central Panama". *Hydrological Processes*, vol. 34, no. 4, pp. 878-897, 2020.
- [9] F. Rejiba, A. Mojica, M. Schmutz, A. Ruíz, M. Castrellón, J. Ladrón De Guevara, S. Saavedra, J. Fábrega, C. Finco, C. Schamper, L.H. Cavalcante y M. Llubes. "Geophysical characterization of near-surface formations in the La Villa River catchment (Los Santos, Panama)", en Conference Proceedings, NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics, Bordeaux, Francia, 2021, pp. 1-5
- [10] A. Mojica, B. Duarte, F. Vergara, M. Pinto, R. Pinzón, J. Pérez, M. Castrellón, C.A. Ho y M. Gómez. "Time-lapse electrical resistivity tomography for assessment of seasonal

- moisture variations in a tropical regolith”. *Hydrological Research Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 18-24, 2022
- [11] S. Pasquet, L. Bodet, A. Dhemaied, A. Mouhri, Q. Vitale, F. Rejiba, N. Flipo y R. Guérin. “Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys: Insights from V_p/V_s or Poisson’s ratios”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 113, pp. 38-50, 2015
- [12] S. Pasquet, L. Bodet, L. Longuevergne, A. Dhemaied, C. Camerlynck, F. Rejiba y R. Guérin. “2D characterization of near-surface V_p/V_s : surface-wave dispersion inversion versus refraction tomography”. *Near Surface Geophysics*, vol. 13, pp. 315-331, 2015
- [13] S. Pasquet y L. Bodet. “SWIP: An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling”. *Geophysics*, vol. 82, no. 6, pp. WB47-WB61, 2017
- [14] Atlas Nacional de la República de Panamá. Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia. Colombia: Impresiones Carpal, pp. 36-37, 2016.
- [15] M. Karous y T.K. Pernu. “Combined sounding-profiling resistivity measurements with the three-electrode arrays”. *Geophysical Prospecting*, vol. 33, no. 3, pp. 447-459, 1985
- [16] M.C. Stadelhofen. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Francia: Technique et Documentation-Lavoisier, 1991
- [17] Y.L. Ekinici y A. Demirci. “A Damped Least-Squares Inversion Program for the Interpretation of Schlumberger Sounding Curves”. *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 22, pp. 4070-4078, 2008
- [18] D.W. Marquardt. “Generalized Inverses, Ridge Regression, Biased Linear Estimation, and Nonlinear Estimation”. *Technometrics*, vol. 12, no. 3, pp. 519-612, 1970
- [19] J.R. Inman. “Resistivity inversion with Ridge Regression”. *Geophysics*, vol. 40, no. 5, pp. 798-817, 1975
- [20] T. Iwasaki. “Extended time-term method for identifying lateral structural variations from seismic refraction data”. *Earth Planets Space*, vol. 54, pp. 663-677, 2002
- [21] A. Scheidegger y P.L. Willmore. “The use of a least square method for the interpretation of data from seismic surveys”. *Geophysics*, vol. 22, no. 1, pp. 9-21, 1957
- [22] A. O’Neill. “Full-waveform reflectivity for modelling, inversion and appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigation”, PhD thesis, The University of Western Australia, 2003
- [23] D. Zywicki y G. Rix. “Mitigation of near-field effects for seismic Surface wave velocity estimation with cylindrical beamformers”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 8, pp. 970-977, 2005
- [24] M. Sambridge. “Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-I. Searching a parameter space”. *Geophysical Journal International*, vol. 138, no. 2, pp. 479-494, 1999
- [25] M. Wathelet, D. Jongmans y M. Ohrnberger. “Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements”. *Near Surface Geophysics*, vol. 2, no. 4, pp. 211-221, 2004
- [26] M. Wathelet M. “An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling”. *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 9, pp. L09301, 2008
- [27] K.H. Stokoe y R.D. Woods. “In situ shear wave velocity by cross-hole method”. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, vol. 98, pp. 443-460, 1972
- [28] D. Tiab y E.C. Donaldson. *Petrophysics. Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Houston: Gulf Publishing, 1996
- [29] H. Stuempel S. Kaehler, R. Meissner y B. Milkereit. “The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments”. *Geophysical Prospecting*, vol. 32, no. 4, pp. 662-675., 1984
- [30] R. Meissner, H. Stuempel y F. Theilen. “Shear wave studies in shallow sediments. Seismic shear waves”, en *Handbook of geophysical exploration. Applications*, (Eds. K. Helbig y S. Treiter), London: Geophysical Press, pp. 225-253, 1985
- [31] H.S. Salem. “Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities”. *Géotechnique*, vol. 50, no. 4, pp. 461-463, 2000
- [32] O. Uyanik. “The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 73, no. 1, pp. 16-24, 2011.