

Caracterización geológico-geofísica del terreno para la cimentación del puente sobre el río Bano

Geological-geophysical characterization of the land for the foundation of the bridge over the Bano river

Noelia Sierra-Cuza^{1*}

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba

*Autor para la correspondencia: noelia.sierra@cenais.cu

Resumen

El presente estudio tuvo la finalidad de evaluar las características geofísicas del subsuelo y determinar las propiedades dinámicas del terreno en el área del puente proyectado sobre el río Bano, en el municipio de Guantánamo. Se aplicó el método eléctrico de resistividad en la modalidad de tomografía eléctrica, así como sísmica de refracción y el método de análisis multicanal de ondas superficiales (2D MASW). Se obtiene que el área investigada presenta condiciones ingeniero-geológicas favorables para cimentaciones superficiales, aisladas o corridas, y que de las tres capas reveladas por la interpretación de datos geofísicos es la capa 3, a unos 12 m de profundidad, la idónea para el emplazamiento de la estructura del puente.

Palabras clave: tomografía eléctrica; sísmica de refracción; método 2D MASW; cimentación; puente Bano; propiedades dinámicas del suelo.

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the geophysical characteristics of the subsoil and to determine the dynamic properties of the terrain in the area of the projected bridge over the Bano River, in Guantánamo municipality. The electrical resistivity method was applied in the electrical tomography modality, as well as refraction seismic and the multichannel surface wave analysis method (2D MASW). It was obtained that the investigated area presents favorable engineering-geological conditions for shallow foundations, isolated or continuous, and that of the three layers revealed by the interpretation of geophysical data, layer 3, at a depth of about 12 m, is the most suitable for the placement of the bridge structure.

Keywords: electrical tomography; refraction seismic; 2D MASW method; foundation; Bano bridge; dynamic soil properties.

1. INTRODUCCIÓN

En los proyectos de ingeniería civil, la correcta identificación de los suelos y rocas y su comportamiento ingeniero-geológico determina el éxito de la obra constructiva. Al diseñar obras subterráneas, los estudios previos para determinar las peculiaridades litoestratigráficas, físico-mecánicas e hidrogeológicas relacionadas con la estabilidad de los macizos son de vital importancia, como igualmente lo es escoger el método, geotécnico o geofísico, que incluya una buena caracterización, abarque el objetivo deseado y sea sostenible desde el punto de vista económico.

Existen numerosas técnicas y procedimientos que permiten realizar la caracterización de suelos, desde métodos sencillos y de bajo costo pero poco precisos, hasta otros muy sofisticados, pero complejos y costosos. Lo que sí resulta importante es escoger una técnica sistemática y uniforme que pueda ser aplicada en todos los sitios, de manera que se obtengan criterios comparables entre los distintos lugares en estudio, así como con condiciones de suelos estudiadas en otras partes del mundo (Schmidt 2014).

El diseño de obras de infraestructura demanda técnicas de generación de información del subsuelo eficientes en términos de calidad de la información, y de tiempo y costo de obtención de la misma. La posibilidad de conseguir este objetivo se encuentra en gran medida en la aplicación de métodos geofísicos. La utilización de los métodos geofísicos en geotecnia presenta dos dificultades mayores desde el punto de vista de la percepción de los usuarios: una, la incapacidad de entender su potencial; y dos, las expectativas exageradas de quienes cuentan con una información incompleta sobre sus potencialidades y sus limitaciones (Arias, Ramírez-Echeverri y Patiño-Hoyos 2012).

Los métodos geofísicos han cobrado gran aplicación para resolver problemas relacionados con la prospección y exploración de yacimientos minerales y materiales de construcción, estudios de deslizamientos, así como la búsqueda de objetos arqueológicos, y en estudios ingeniero geológicos (Fonseca-Benítez 2018).

Los puentes son obras de ingeniería que interactúan de manera determinante con el medio ambiente circundante. Un diseño satisfactorio garantiza su supervivencia y evita afectaciones de consideración a la ecología de su zona

de emplazamiento. Varios puentes en Cuba han sido severamente afectados por el fenómeno de la socavación, presentando fallas que impiden su utilización y que, por tanto, interrumpen la circulación por dichas vías. Se considera entonces de extraordinaria importancia el análisis de los requerimientos establecidos en Cuba para considerar la incidencia del suelo en la respuesta estructural de los puentes (Sánchez-Candebat *et al.* 2016).

El presente estudio geofísico tuvo la finalidad de evaluar las características geológicas y geofísicas del subsuelo del área del puente proyectado sobre el río Bano y determinar las propiedades dinámicas del terreno, de forma tal que permitiera evaluar las condiciones del lugar y garantizar de manera segura y menos costosa la cimentación.

El área investigada se encuentra al noroeste de la ciudad de Guantánamo, entre las coordenadas (X) 669146; (Y) 169613, ubicada en el km 0,3 de la autopista en construcción Circunvalante Norte, municipio de Guantánamo (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del área de trabajo. (Imágenes editadas tomadas de Google Earth).

De acuerdo con el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000 (Núñez-Cambra *et al.* 2010) las formaciones geológicas que predominan en los alrededores del área de estudio son Fm. San Luis, Fm. Maquey, Fm. Charco Redondo y la Fm. Jamaica.

La geología del área está conformada por sedimentos recientes en su parte superior, los cuales han sido el resultado de la meteorización de las rocas que les dan origen y otros que han sido transportados, formando capas de suelos

limo-arenosos de color carmelita, que en muchos casos superan los 10 cm de espesor.

En otras zonas a orillas del río Bano, en la cuenca hidrográfica que atraviesa el área de estudio, se identificó la acumulación de sedimentos, formando capas de conglomerados no consolidados de cantos de distintas granulometría y composición, en una matriz limo-arenosa calcárea de origen aluvial que subyace a las rocas areniscas finas con intercalaciones de lutitas muy intemperizadas.

Los afloramientos están compuestos en su parte superior por areniscas de grano fino y coloración gris oscuro, bien consolidadas y estratificadas, con grietas entre 1 mm y 3 mm de espesor, rellenas de material arenoso. Las potencias de sus estratos varían desde 15 cm hasta los 30 cm. Se han identificado además, subyaciendo a las areniscas finas, otras formadas por clastos más gruesos, con intercalaciones de lutitas de color gris muy alteradas y tectonizadas (Medina *et al.* 2021).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon métodos geofísicos: eléctricos y sísmicos. Con el método de resistividad eléctrica, en la modalidad de tomografía eléctrica (TE), se determinó el grado de resistividad de las capas ingeniero-geológicas que conforman el área de estudio; el método sísmico de refracción y el método de ondas superficiales análisis multicanal de ondas superficiales (2D MASW) permitieron obtener los valores de las velocidades de las ondas y, por lo tanto, los módulos elásticos dinámicos del terreno.

Tomografía Eléctrica (TE)

Los métodos eléctricos son una técnica geofísica antigua, empleándose en ingeniería geológica, minería, arqueología, obras públicas y medio ambiente (Gutiérrez-Moya, Peña-Torres y Martínez-Contreras 2020). La técnica de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (*Electrical Resistivity Tomography, ERT*) en dos dimensiones es un método geofísico eléctrico en corriente continua que permite investigar de manera continua la variación de la resistividad del subsuelo en profundidad y lateralmente, por lo que se dice que es la aproximación más precisa del subsuelo, siendo un modelo bidimensional donde se asume que la resistividad puede cambiar tanto en la vertical como lateralmente a lo largo de la línea de investigación (Giménez 2020).

La TE permite representar los datos de resistividad del subsuelo en forma de pseudosecciones y la inversión de las resistividades aparentes proporcionan una imagen del modelo de resistividades del subsuelo (Carrasco-García 2010). Mediante TE se realizaron ocho perfiles, cuatro de ellos en

dirección longitudinal (de norte a sur) con respecto al eje del río Bano. Estos perfiles tuvieron paso de medición de 3 m y longitud final del tendido de 66 m, designados como:

T –Perfil de Tomografía Eléctrica

L – Longitudinal

T – Transversal

C – entre las calas

TLC1-2 y TLC5-6 al oeste, TLC15-16 y TLC13 al este; así como cuatro transversales (de este a oeste) con paso de medición de 2 m y un tendido de 46 m de longitud (excepto el perfil TTC2-6, que resulta del encadenamiento de dos perfiles para una longitud de 106 m) denominados: TTC1-5 y TTC2-6 al oeste, TTC13-15 y TTC16 al este; para un total de ocho imágenes topográficas (teniendo en cuenta los dos perfiles concatenados).

Para estudiar las características geológicas del área se utilizó la variante de configuración de electrodos Wenner-Schlumberger, la cual garantiza una buena señal y la caracterización de las resistividades aparentes en las imágenes proyectadas, aumentando la zona de cálculo en los extremos de los perfiles y una buena resolución para capas geológicas horizontales.

La TE se realizó con el equipo de marca francesa Syscal R1, con 24 electrodos para determinar la resistividad; la profundidad con ese dispositivo llegó hasta los 10 m de potencia.

Sísmica (Refracción y 2D MASW)

Los métodos sísmicos tales como Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) estudian la respuesta del terreno cuando se propaga a través de este una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro que se analiza es la velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de estos (Gutiérrez-Moya, Peña-Torres y Martínez-Contreras 2020).

El método de refracción sísmica está basado en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas en propagarse desde un punto de la superficie donde son generadas hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo y, de estos, hasta otro punto ubicado en la superficie, en donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos alineados con la fuente de energía. Las ondas sísmicas se crean artificialmente

mediante el impacto que produce en la superficie la caída de objetos pesados o golpes de mandarrias, o bien, con la detonación de explosivos en barrenos someros (Rodríguez-Cruz 2010).

El análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) es un método no destructivo, usado para evaluar la velocidad de la onda de corte (V_s). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Pereira *et al.* 2018).

Es conocido que las ondas de alta frecuencia poseen una longitud de onda corta, por lo que alcanzan poca profundidad, contrario a lo que sucede con ondas de baja frecuencia que poseen longitudes de onda más largas y alcanzan mayor profundidad. Por ello, a mayores profundidades de estudio las frecuencias son más bajas.

Para el estudio de velocidades con el método MASW experimentalmente se ha establecido que las frecuencias entre 5Hz y 70Hz permiten una velocidad de fase aparente experimental o curva de dispersión óptima con lo que usualmente se alcanzan profundidades de 10 m a 30 m, en dependencia de las características geotécnicas internas del sitio (Sánchez-Duarte, Contreras y Torres 2020).

Para obtener las velocidades longitudinales por sísmica de refracción, se realizaron cuatro perfiles transversales, designados por:

SR – Perfiles de sísmica de refracción

L - longitudinales

Dos perfiles se ubicaron al oeste del río (SRL1 y SRL2) y dos al este (SRL3 y SRL4), en dirección N-S, cada uno con cinco tiros o fuentes de ondas producidos con el golpe de una mandarria de 20 lb sobre un plato de aluminio; se utilizaron 12 geófonos de 10 KHz, con distancia entre geófonos de 3 m.

En este método se empleó un equipo marca PASI, italiano, modelo 12S12-16G, de 12 geófonos, equipo combinado –sismógrafo y tomógrafo eléctrico-encargado de verificar el buen estado de las conexiones y almacenar digitalmente todos los valores de resistividad (en este caso solo se midió con el equipo la sísmica de refracción).

Para la adquisición de los datos del método de ondas superficiales 2D MASW se realizaron dos perfiles, uno al oeste (SSL5) del río y otro al este (SSL6) (SS –perfiles de Sísmica de MASW 2D). Se empleó para las mediciones el equipo Terraloc de 24 canales fabricado por ABEM, mediante puestas sísmicas

de 46 m con distancias entre geófonos y puntos de excitación de 2 m, con excitación mecánica. Los tiempos de registro fueron de un segundo y el intervalo de muestreo de 0,125 ms; para la excitación de las ondas se utilizó una mandarria de 20 lb y plato de aluminio.

Cada perfil de medición se amarró a la cala proyectada, con puntos previamente marcados. En la Figura 1, se muestra el esquema de la ubicación de los perfiles para los tres métodos.

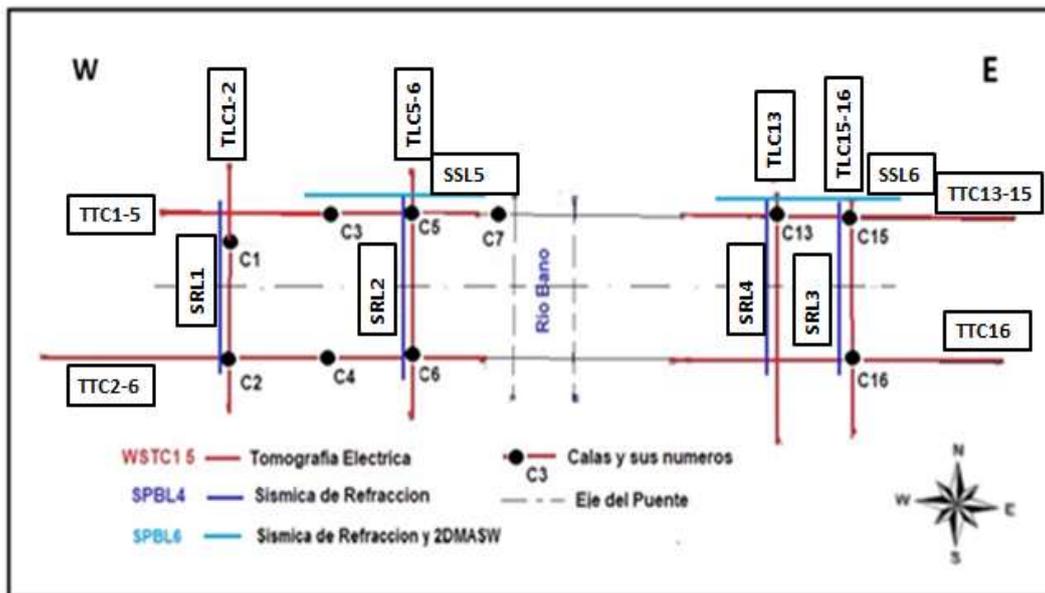


Figura 2. Esquema de la ubicación de la Tomografía Eléctrica, Sísmica de Refracción, Método de Ondas Superficiales 2D MASW y las calas perforadas (Editado de Medina *et al.* (2021)).

El objetivo de la unión de los métodos sísmicos referidos fue obtener la distribución de las velocidades de las ondas de cizallamiento (transversales) y de las ondas de compresión (longitudinales), esenciales para la determinación de módulos y parámetros físico-mecánicos de los suelos y rocas, como son: Rigidez (G), Módulo de Young (E), Módulo de Bulk (K) por profundidades y el Coeficiente de Poisson, así como la distribución geométrica de los estratos presentes en el área de estudio y la determinación o detección de posibles factores geológicos adversos en el área de estudio que respondan al campo físico del método empleado.

Con estos datos fue posible establecer la discriminación del corte y con apoyo de las calas validar los resultados y establecer las correlaciones entre las resistividades de las rocas y velocidades de los sedimentos de la parte superficial del corte.

Para apoyar la interpretación geofísica se utilizaron 7 calas paramétricas de las 10 perforadas, obteniéndose las características de resistividades eléctricas

y las velocidades de las capas geológicas presentes, que constituyen la base de las interpretaciones geológico-geofísicas.

Para el procesamiento de los datos de TE inicialmente se procedió a utilizar el programa ProsysII, el cual facilita en los equipos de la firma francesa IRIS, procesar los datos primarios, incorporarle la topografía y realizar el filtrado, para convertirlo en ficheros .dat, y procesarlos en el programa Res2DInv mediante iteraciones, determinando un modelo bidimensional de la resistividad del subsuelo, permitiendo filtrar los datos que se encuentran muy dispersos del resto, debido a que estos generan errores en los resultados. Cada valor medido de resistividad eléctrica fue revisado y filtrado para asegurar una buena calidad de los datos primarios.

El programa Res2dInv (Geotomo Software Inc.) emplea la solución del problema inverso para obtener el modelo de las resistividades reales del subsuelo para la confección de las pseudosecciones (imágenes) y el modelo inverso propuesto de cada una de los perfiles medidos (Pérez-Barzaga, Carraz-Hernández y Blanco-Concepción 2022).

Se empleó el programa SeisImager de la compañía Geometrics, un paquete informático compuesto por varios módulos diseñados para el procesamiento completo de los datos sísmicos adquiridos. Con los módulos de SeisImager: Pickwin, Plotrefa, WaveEq, Surface Waves Analysis y Geoplot. A través de Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves) y Plotrefa (Refraction Analysis) se elaboraron cortes donde se muestran los contrastes de velocidades de las ondas P, empleando como método de interpretación Tomography (Tomografía Sísmica). Los módulos Surface Wave Analysis Winzard, Geoplot (Visualize Data) y WaveEq (Surface Wave Analysis), fueron las herramientas encargadas del trabajo con ondas superficiales de tipo Rayleigh (GEOTOMO 2017).

3. RESULTADOS

Los valores de resistividad en los perfiles ubicados al este del río Bano son similares a los del oeste, con valores entre los 3 Ω m y 18 Ω m (Figura 3). Los mínimos, entre 3 Ω m y los 6 Ω m, se presentan en menor porción en los perfiles, aunque se manifiestan de manera anómala en el perfil TLC13, donde se observan áreas aisladas por debajo de los 3 m con diferentes longitudes y espesores; en el perfil TTC16 se dibujan dos anomalías, la primera por encima de los 3 m, hacia el centro del perfil, un poco al oeste con longitud de 15 m, y la segunda por debajo de 3 m hacia el este, con espesor de unos 10 m y longitud de 8-9 m, aproximadamente. Estos mínimos resistivos podrían estar desencadenados por la presencia de rocas poco alteradas con posible presencia de agua y materiales finos, teniendo en cuenta la presencia del

nivel freático y materiales geológicamente representados por fragmentos de rocas originarias, que forman bloques de diferentes tamaños, hasta arcillas.

Casi la totalidad de las secciones analizadas están representadas por valores medios que oscilan entre los 7 Ωm y los 12 Ωm , caracterizadas por rocas alteradas, algo húmedas con alguna que otra presencia de arena.

Los máximos resistivos circulan desde los 12 Ωm a los 18 Ωm representando las rocas más duras de los cortes. Los valores de resistividad del perfil TLC13 difieren con respecto al resto, fluctuando entre 4 Ωm y 24 Ωm .

El análisis de los resultados de la tomografía sísmica, realizada a una profundidad de investigación de 20 m para los cuatro perfiles, permitió determinar tres capas y observar el comportamiento de las velocidades de las ondas P (V_p). Se obtuvo cortes de cada uno de los perfiles, encontrando que: en la primera capa se registran los valores más bajos de velocidad (entre los 200 m/s y los 400 m/s) asociados a rocas más blandas; en la segunda capa, ubicada entre los 3 m y los 10 m aproximadamente, las velocidades varían entre los 800 m/s y los 1 100 m/s, con espesores de hasta 6,5 m, manifestándose un comportamiento del medio más o menos homogéneo, o sea, no se evidencia en las isolíneas observadas en las tomografías sísmicas, ni en los cortes obtenidos, un alto nivel de variabilidad, lo que es reflejo de la calidad de las rocas desde el punto de vista constructivo. En la tercera capa se observan los mayores valores de velocidad (entre 1 250 m/s y 2 000 m/s), lo que delata la presencia de una roca más fuerte y compacta, por tanto más sana.

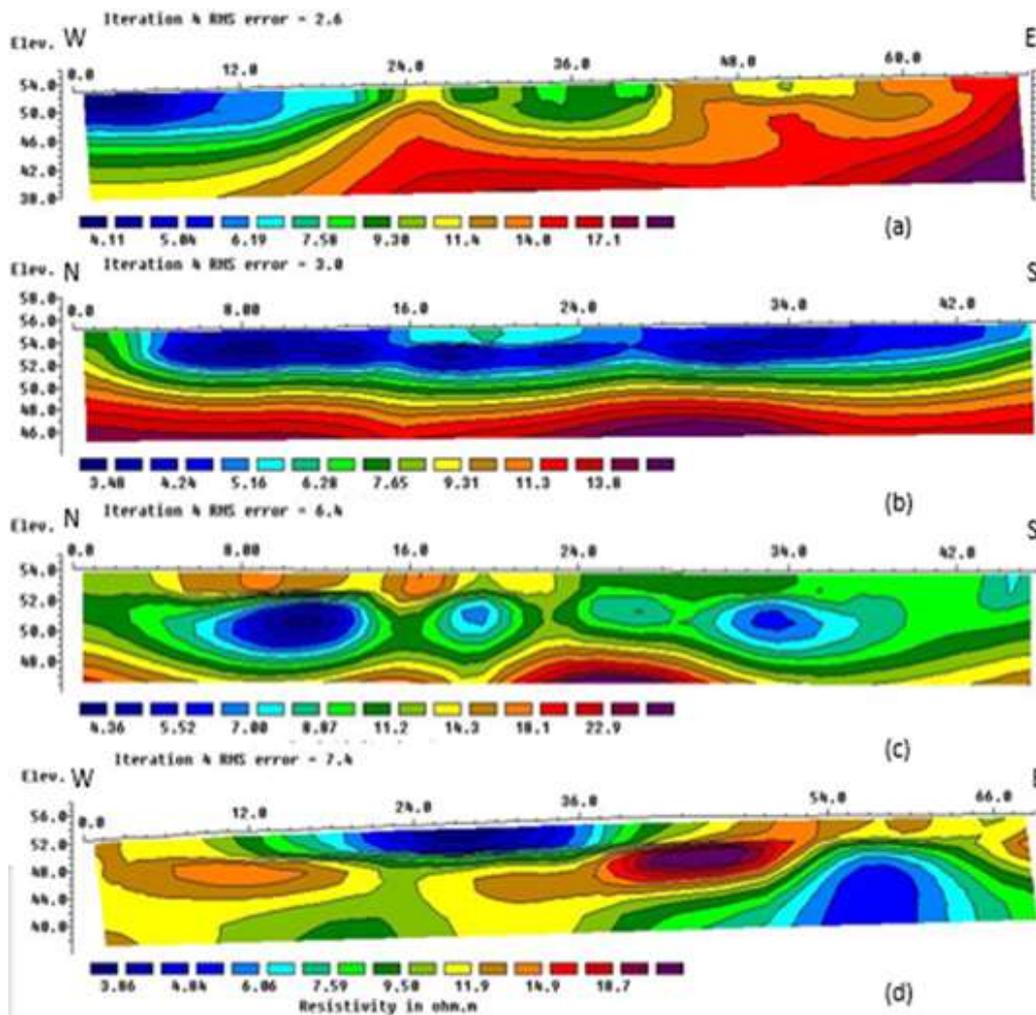


Figura 3. Modelos de resistividad de los perfiles tomográficos ubicados al este del río Bano. (a) TTC13-15; (b) TLC15-16; (c) TLC13 y (d) TTC16.

Para la Sísmica de Ondas Superficiales 2D MASW se elaboraron dos perfiles SSL5 (al oeste) y SSL6 (al este). Es importante destacar que en el procesamiento de los datos el error medio cuadrático del perfil SSL5 fue de 7% (con 8 iteraciones), y el del perfil SSL6 fue de 7.9% (con 5 iteraciones), los cuales fueron calculados directamente por el programa. Los datos más confiables de estos perfiles, según el programa, son los que están hasta los 16,1 m de profundidad en el perfil SSL5 y hasta los 13,5 m en el SSL6. En las primeras capas de cada perfil se visualiza la disminución de la velocidad de las ondas (Tabla 1).

Tabla 1. Valores observados en los modelos de velocidad de las ondas S (V_s) y P (V_p) vs Profundidad para los perfiles SSL5 y SSL6

Perfiles	Capas	Profundidad (m)	Espesor (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
SSL5	1	0 - 2,6	2,6	334 - 269	340 - 310
	2	2,6 - 10,4	7,8	308 - 690	320 - 2000
	3	10,4 - 20	9,6	787 - 842	2200 - 2300
SSL6	1	0 - 2,6	2,6	268 - 253	310 - 305
	2	2,6 - 10,4	7,8	299 - 568	320 - 1900
	3	10,4 - 20	9,6	631 - 728	2000 - 2100

De la interpretación del 2D MASW obtenida automáticamente por el programa se conforma la Tabla 2 correspondiente al perfil SPBL6, la cual muestra los valores V_s , V_p , densidad y profundidad de las diferentes capas que se exponen de acuerdo con los respectivos contrastes, para este caso 15 capas; estas fueron reagrupadas en tres capas de acuerdo con el comportamiento de V_p y V_s , se calcularon las medias de los valores para cada una.

Cabe destacar la diferencia entre los valores obtenidos por la sísmica de refracción para V_p , lo que se atribuye a los filtros aplicados en el procesamiento para el mejoramiento de las curvas de dispersión, además de que se cortaron las frecuencias entre los 4,5 Hz y 40 Hz, para solo estudiar las frecuencias establecidas entre 15 Hz y 38 Hz, por lo que las velocidades bajas comprendidas fuera de este rango el programa no las considera

Tabla 2. Resultados de la técnica 2D MASW obtenidos por el programa SeisImager. Perfil SSL6

Profundidad (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Densidad (kg/ cm ³)	Capa	Espesores aproximados medios (m)
0	314,8031	1639,431	0,001832		
0,535713	311,3763	1635,628	0,001831		
1,153847	297,3863	1620,099	0,001826	1	3
1,854397	279,8156	1600,595	0,00182		
	300,8453	1623,938	0,001827		
2,637364	292,0263	1614,149	0,001824		
3,502747	378,7053	1710,363	0,001854		
4,45055	456,8468	1797,1	0,001881		
5,48077	506,536	1852,255	0,001898		
6,593407	601,3072	1957,451	0,001929	2	9
7,78846	677,5599	2042,091	0,001954		
9,065934	693,5367	2059,826	0,001959		
10,425823	721,1329	2090,457	0,001968		
	540,9564	1876,832	0,001909		
11,868129	772,6943	2147,691	0,001985		
13,392856	795,9332	2173,486	0,001992		
18,214284	830,5093	2211,865	0,002003	3	6
	799,7123	2177,68	0,001994		

Valores medios en negritas

Los resultados mostrados en las tablas son aproximaciones. Existe una gran semejanza entre ambos perfiles. Se destaca la disminución en las velocidades de las ondas P y S, mostrando un comportamiento en descenso que ocurre aproximadamente por encima de los 3 m de profundidad. Debido a esto puede afirmarse la presencia de rocas más deleznable con un alto grado de agrietamiento rellenas de agua en esta capa, debido a que se encuentra muy cercana al nivel freático (corroborando la información de las calas) y, además, forma parte de la superficie del terreno contiguo a las proximidades del río.

Hacia la segunda y tercera capas se observa un comportamiento más homogéneo lo que hace suponer la presencia de rocas más resistentes. Por último, las mayores velocidades se visualizan por debajo de los 12 m aproximadamente.

4. DISCUSIÓN

La interpretación integrada de los datos tuvo en cuenta la relativa homogeneidad en el área de estudio corroborada por los métodos geofísicos

y las calas realizadas en el sector, por lo que se decidió integrar los datos geológicos y la geofísica en los perfiles TTC13-15 y SSL6, ubicados al este del río; se seleccionaron los perfiles de la técnica 2D MASW atendiendo a una mayor completitud de los resultados y mayor cercanía a la realidad, en comparación con la sísmica de refracción; el perfil de TE seleccionado se elaboró en una misma línea respecto al de sísmica (Figura 4).

Las resistividades en los perfiles no difieren mucho entre sí; de acuerdo con la profundidad de estudio que se asume para los límites entre capas y para el cálculo de las propiedades elásticas, pueden separarse y validarse por las calas respectivas tres capas rocosas.

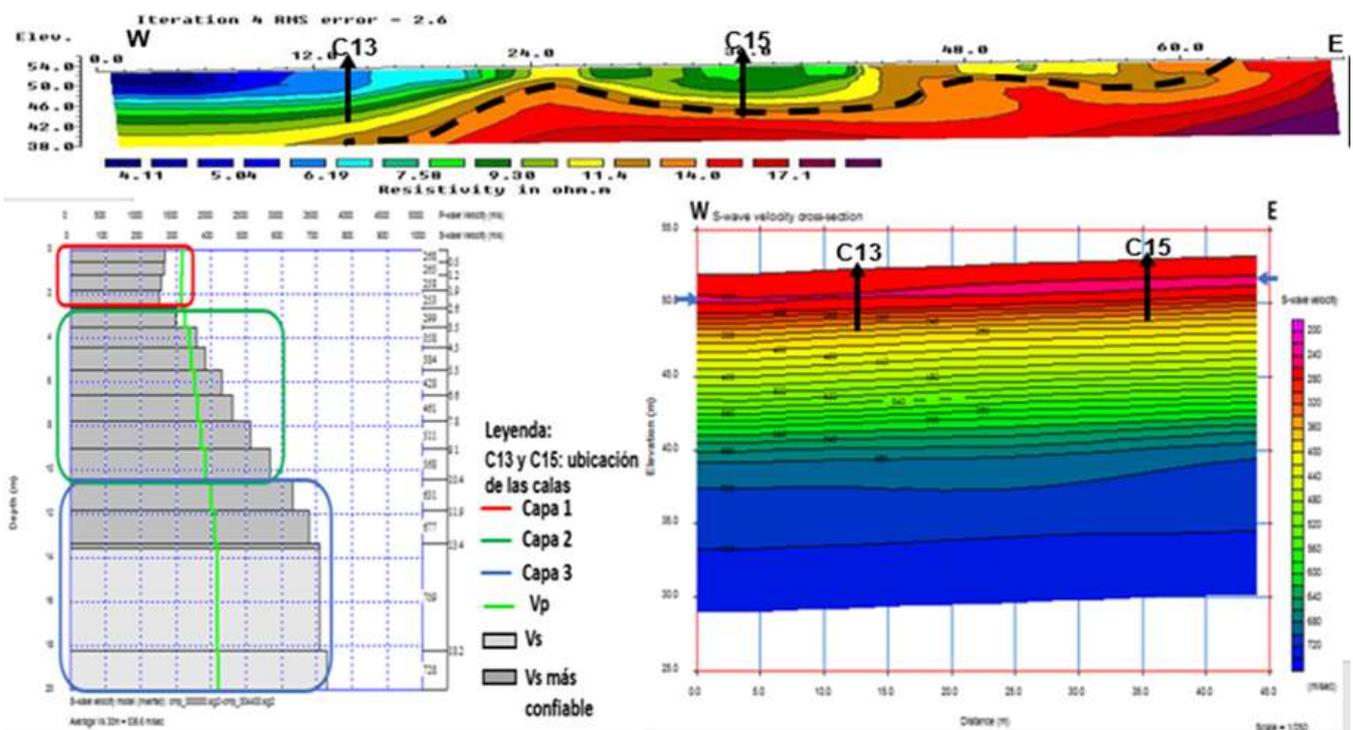


Figura 4. Integración de los cortes obtenidos de los perfiles TTC13-15 y SSL6

El primer estrato está formado por dos capas: la capa vegetal y las arcillas de baja plasticidad con arenas, firmes y duras. Ambas forman la primera capa de la interpretación geofísica, con velocidades alrededor de los 300 m/s para Vs y 1500 m/s para Vp. Esta capa se mantiene en toda el área de investigación y su base, relacionada con la línea del nivel freático, presenta resistividades que varían ampliamente desde los 4 Ω m hasta los 12 Ω m, según sea el contenido de agua y arcilla en el suelo. Su potencia promedio oscila alrededor de los 3 m a 4 m.

La segunda capa aparece a continuación de la capa arcillosa, con potencia de hasta 9 m y velocidades que oscilan alrededor de los 540 m/s para Vs y

valores de Vp aproximados a los 1 800 m/s; es una capa de transición de las lutitas alteradas y fracturadas algo húmedas con intercalaciones de areniscas.

La tercera capa la constituyen lutitas muy duras, consolidadas, con lentes de gravas, con resistividades mayores de 20 Ωm y velocidades de hasta 800 m/s de Vs y mayores de 2000 m/s para Vp. La potencia de esta capa supera los 10 m. Constituye la capa base, dura y consolidada del corte geológico del área (Figura 5).

No siempre es tan homogénea la relación de las potencias de las capas, influyendo en ello la humedad, granulometría y la dureza de las rocas, creando límites claros entre ellas. En la parte inferior del corte están siempre las mayores resistividades y velocidades longitudinales. Esto es una característica de la formación la Fm. San Luis (sl) presente en el área, aquí predominan las lutitas, con intercalaciones de areniscas. No se muestran sedimentos calcáreos.

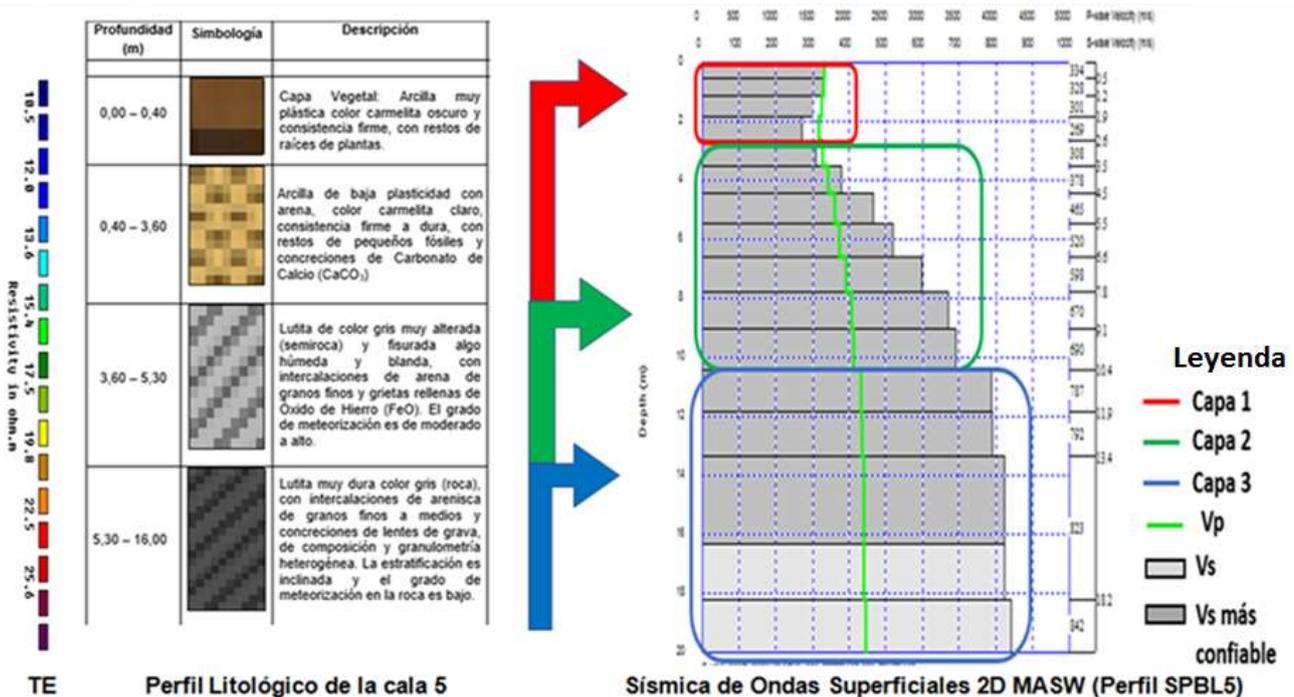


Figura 5. Correlación entre los resultados sísmicos por la técnica 2D MASW del perfil SSL5, con la escala de valores del perfil TTC1-5 de Tomografía Eléctrica y la cala paramétrica 5

Los resultados de la sísmica muestran ciertas semejanzas en las capas señaladas por la TE, aunque no se corresponden en su totalidad con las mismas potencias para cada una de ellas, en general, coinciden los horizontes sísmicos, validados por las calas. Influyen en estos resultados el grado de humedad. Correlacionando los resultados sísmicos, con la TE y las calas paramétricas pueden diferenciarse las velocidades longitudinales y las resistividades, con las litologías. Con estos resultados de velocidades se

realizaron los cálculos de las propiedades elásticas de las litologías presentes en el área de estudio (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de los parámetros físicos-mecánicos del perfil SSL6

Profundidad (m)	Capa	μ	G (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	K (kg/cm ²)	Qu (kg/cm ²)	ϕ
0		0,48	1410,08	4168,9	31954,69	11,17	
0,53	1	0,48	1375,91	4069,08	31817,23	10,9	3,4
1,15		0,48	1309,38	3874,53	31544,85	10,37	
1,85		0,48	1255,03	3715,45	31317,46	9,95	
2,64		0,47	1765,58	5204,77	33302,18	13,96	
3,50		0,47	2538,91	7441,09	35853,37	20,01	
4,45		0,46	2931,36	8567,86	37009,36	23,07	
5,48	2	0,45	3660,9	10649,36	38984,85	28,74	6,4
6,59		0,45	4263,8	12357,6	40486,02	33,4	
7,79		0,44	5261,1	15161,7	42774,24	41,09	
9,06		0,43	6551,26	18753,05	45465,36	50,98	
10,42		0,42	8136,52	23116,1	48471,12	63,05	
11,87		0,41	9418,85	26209,42	50720,5	72,77	
13,39	3	0,41	10354,56	29139,86	52279,78	79,83	2,5
18,21		0,4	10937,55	30708,96	53221,05	84,22	

Donde:

ρ es la densidad del material.

Relación de Poisson (μ)

$$\mu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2} \quad (1)$$

Módulo de Young (E)

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (2)$$

Módulo de Rigidez (G)

$$G = \rho v_s^2 \quad (3)$$

Módulo de Bulk (K)

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4)$$

Para obtener los valores de la porosidad (\emptyset) se empleó la fórmula de tiempo promedio (5)

$$\emptyset = \frac{Vr}{Ve-Vr} + \frac{VrVe}{Ve-Vr} \frac{1}{V} \quad (5)$$

La resistencia a la compresión (q_u) se define por la ecuación (6)

$$q_u = \frac{\left(\frac{E}{340}\right) + \left(\frac{G}{140}\right)}{2} \quad (6)$$

Los resultados de los cálculos de los parámetros físico-mecánicos (Sacasa-León 2019) y la porosidad (Tabla 3) para el perfil SPBL6 evidencian las variaciones de los valores en las diferentes capas. Estos resultados brindan al proyectista las características que presenta cada sección en las capas que componen los perfiles, posibilitando que este defina espacialmente los mejores comportamientos. Proponer el área ideal para el emplazamiento del puente supone escoger aquellas zonas donde sean mayores los valores de E y G, lo que garantizan la ubicación sobre rocas más resistentes.

La unión de los métodos de tomografía eléctrica, la sísmica de refracción y la de ondas superficiales 2D MASW permitió eliminar la ambigüedad de los resultados y respaldar los datos geológicos. Destacan por la rapidez en la ejecución de los trabajos de campo y la obtención de los resultados preliminares y definitivos. Estos métodos se deben utilizar formando parte del conjunto integral de métodos de investigación. Cabe destacar que se toman como valores de Vp los resultados brindados por la técnica 2D MASW además de las Vs, debido a que estos guardan mayor cercanía con la realidad.

Se proponen tres capas de acuerdo con los resultados geofísicos donde, la primera capa está constituida por dos capas geológicas, la capa vegetal y otra capa compuesta por arcillas plásticas con arenas, posee un espesor relativo de 3 m con velocidades que oscilan entre los 300 m/s para Vs y para Vp entre los 1500 m/s; la segunda capa: compuesta por lutitas alteradas y fracturadas algo húmedas con intercalaciones de areniscas y un espesor medio de 9 m con velocidades que varían alrededor de los 540 m/s para Vs y valores de Vp aproximados a los 1 800 m/s; y la tercera capa, formada por lutitas muy duras con lentes de gravas, presenta velocidades hasta 800 m/s de Vs y mayores de 2 000 m/s para Vp.

Las resistividades varían en los órdenes de entre los 4 Ω m y los 20 Ω m, producto del contenido de arcilla, el grado de humedad en las rocas y el nivel

de compactación de las mismas; manifestándose resultados mayores por debajo de los 10 m de profundidad. Se detectó el nivel del manto freático aproximadamente hacia los 3 m de profundidad, circulando con un flujo laminar entre las fisuras y oquedades de las rocas alteradas y agrietadas de la formación San Luis.

5. CONCLUSIONES

- Los parámetros físico-mecánicos obtenidos corroboran con los datos de la geología que el área investigada presenta condiciones ingeniero-geológicas favorables para cimentaciones superficiales, aisladas o corridas, en función de las exigencias del proyecto.
- Las perforaciones para la cimentación del puente deben alcanzar la capa 3 ubicada alrededor de los 12 m. Los valores de velocidad, en un rango de los 1 250 m/s y los 2 000 m/s, indican la presencia de una roca fuerte y compacta a esa profundidad.

6. REFERENCIAS

- Arias, D.; Ramírez-Echeverri, O. y Patiño-Hoyos, F. 2012: Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31: 39-50. ISSN 0120-3630. Consulta: 25/12/2022. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8777>
- Carrasco-García, P. 2010: *Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial*. Pablo G. Silva Barroso y Arturo Farfán Martín (Tutores). Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila. 523 p.
- Fonseca-Benítez, F. A. 2018: Modelación geológico-geofísica con fines hidrogeológicos en los municipios Corrales y Gámeza, Colombia. *Minería y Geología*, 34(1). Consulta: 25/12/2022. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223554993005>
- Geotomo Software Inc. 2017: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner, dipole-dipole, inline pole-pole, poledipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays on land, aquatic, cross-borehole and time-lapse surveys.
- Giménez, M. 2020: Aplicación de métodos geofísicos al estudio del sistema hidrogeológico Libertad Raigón de Uruguay. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2): 185-196.
- Gutiérrez-Moya, A.; Peña-Torres, J. y Martínez-Contreras, M. 2020: Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica.

- Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 48(Febrero-Julio): 30-45.
- Núñez-Cambra, K; Carrillo, D.; Echavarría, B.; Castellanos, E. y Triff, J. 2010: Mapa Geológico de la República de Cuba escala 1:1 000 000. Hoja 5176. Instituto de Geología y Paleontología (IGP).
- Pereira-Maria, A.; Fernández, H. M.; Baptista, J. J. y Pereira-Pires, G. 2018: Procedimiento metodológico para aplicar la geofísica a estudios geotécnicos en la ciudad de Luanda, Angola. *Minería y Geología*, 34(2). Consulta: 25/12/2022. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223554994005>
- Pérez-Barzaga, M.; Carraz-Hernández, O. y Blanco-Concepción, C. 2022: Aplicación de los métodos geofísicos Georradar y Tomografía Eléctrica en el estudio de taludes. Casos de estudio: ZED Mariel Zona A5 y Castillo de Santo Domingo de Atarés. *Geociencias UO*, 5(2): 80-91. Consulta: 25/12/2022. Disponible en: https://geocienciasuo.olmeca.edu.mx/wp-content/uploads/2023/01/Art-2-Geociencias_UO-10-Aplicacion-de-los-metodos-geofisicos-georradar-y-tomografia-electrica-en-el-estudio-de-taludes..pdf
- Rodríguez-Cruz, E. 2010: *Utilización de un complejo de métodos geofísicos en la caracterización físico-geológica del tramo II del túnel Levisa-Mayarí*. Fernández Núñez, Héctor M. (tutor). Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. 175 p.
- Sacasas-León, C. 2019: Estudios ingeniero geológicos e hidrogeológicos para geofísicos. Repositorio de la Universidad Tecnológica de La Habana. 213 p.
- Sánchez-Candebat, D.; Melgares-Godínez, G.; Cornier-Caballero, L. y Álvarez-Rivera, Z. 2016: Influencia del suelo en el diseño sismorresistente de puentes en Cuba. *Revista Cubana de Ingeniería*, VII(3): 25-34. ISSN 2223-1781. Consulta: 25/12/2022. Disponible en: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/469>
- Sánchez-Duarte, J; Contreras, M. y Torres, J. 2020: Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional "La cortada", Pamplona (Norte de Santander) a partir de datos geofísicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(36). Consulta: 25/12/2022. Disponible en: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/3991

Schmidt, V. 2014: Clasificación de suelos de 15 estaciones acelerográficas, mediante el uso de métodos basados en vibraciones ambientales y del parámetro Vs30. *Revista Geológica de América Central*, (51): 33-67. ISSN 0256-7024. Consulta: 25/12/2022. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0256-70242014000200002&script=sci_arttext

Información adicional**Conflictos de intereses**

La autora declara que no existen

ORCID

<http://orcid.org/0009-0009-3933-3981>

Recibido: 12/06/2023

Aprobado: 11/07/2023