

Aplicación del georradar para prospección de agua subterránea en la cuenca Sabanalamar, Guantánamo

Applying georadar for groundwater prospection in Sabanalamar basin, Guantánamo province

Juan Inocencio Medina-Hechavarría^{1*}, Joendris Manual-Castellanos¹, Sandra Yanetsy Rosabal-Domínguez¹

¹Empresa Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.

*Autor para la correspondencia: chencho@santiago.geocuba.cu

Resumen

El déficit de recursos hídricos en el municipio costero de San Antonio del Sur, provincia cubana de Guantánamo, es uno de los principales desafíos a enfrentar por todos los factores de la sociedad. El objetivo de esta investigación fue proponer áreas favorables para la prospección de aguas subterráneas en la parte baja de la cuenca hidrográfica de Sabanalamar mediante el empleo de la técnica del georradar. Se midieron cinco perfiles para caracterizar con precisión la sección geológica y obtener información sobre la secuencia estratigráfica, profundidad del nivel freático y del manto rocoso. Los radargramas se interpretaron y compararon con datos de pozos, lo cual permitió establecer la profundidad del nivel freático entre los 3,0 m y 4,0 m. Se proponen como áreas potencialmente favorables para la prospección de aguas subterráneas las ubicadas más al oeste del sector evaluado.

Palabras clave: georradar, agua subterránea, cuenca hidrográfica Sabanalamar, nivel freático

Abstract

Water resources deficiency in San Antonio del Sur municipality in Guantánamo province, Cuba is one of the main challenges to face by all factors of society. This study proposes favorable areas for groundwater prospection in the lower part of Sabanalamar watershed using the georadar technique. Five profiles were measured to accurately characterize the geological section and obtaining information related to stratigraphic sequence, depth of the water table and bedrock. Radargrams were interpreted and compared with data from the wells, which allowed to establish the water table depth between 3.0 m and 4.0 m. These results propose the

further west located areas of the evaluated sector as potentially favorable areas for groundwater prospecting.

Keywords: georadar, groundwater, Sabanalamar hydrographic basin, water table

1. INTRODUCCIÓN

El georradar es una técnica no destructiva, y no invasiva, orientada al estudio del subsuelo superficial; se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos. El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1 ns -20 ns de duración hacia el interior del terreno. En este caso la antena utilizada fue de 100 MHz para alcanzar una profundidad de estudio mayor.

Al nivel internacional diversos son los trabajos que han aplicado el método del georradar con resultados satisfactorios para la búsqueda de agua subterránea y para el estudio de la zona no saturada del suelo en diferentes ambientes geológicos, así como para la mejora del rendimiento de la red hídrica (García *et al.*, 1996; Annan, 2003; Carcione *et al.*, 2003; Lapazaran, 2004; Biskup *et al.*, 2005; Tavera, 2008; Hernández, 2017; Schwarck *et al.*, 2020; Soldi, 2020; Ruffell & Parker, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

En Cuba oriental se ha aplicado este método para la búsqueda de arena (Acosta & Dussac, 2016). Se reportan también trabajos realizados por la OSDE Gestión Integrada de las Aguas Terrestres (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Guantánamo, 2023) para la propuesta de rediseño de la red hidrogeológica de esta provincia. Igualmente se ha aplicado el método en diversos estudios ingeniero-geológicos para la ubicación de viviendas en las localidades de El Paraíso, El Jamal y Yumuri, ubicados en Baracoa (Socorras *et al.*, 2021a, 2021b, 2021c) y para evaluar puntos críticos del viaducto La Farola (Rosabal *et al.*, 2024 a, b, c, d).

El déficit de recursos hídricos que presenta la zona oriental de Cuba se ha convertido en uno de los principales desafíos a enfrentar por los órganos de gobierno y por todos los factores de la sociedad. Esta situación se agudiza en el municipio costero de San Antonio del Sur, perteneciente a la provincia de Guantánamo, debido a los efectos adversos del cambio climático y acciones antrópicas que han provocado desequilibrio en el flujo de las fuentes superficiales de agua en el área.

Específicamente en la cuenca hidrográfica de Sabanalamar se han desarrollado escasas investigaciones geofísicas, entre las que cabe mencionar la realizada por Dussac *et al.* (2017) en el proyecto Arena Sabanalamar.

Es conocido que la aplicación de métodos geofísicos a la hidrogeología resuelve aspectos relativos a la geometría de las formaciones rocosas del subsuelo, el espesor y posición en profundidad de niveles rocosos con influencia en el comportamiento hidrogeológico del área de estudio, posición de nivel freático y otros.

El propósito de esta investigación fue proponer, a partir de la aplicación de la técnica del georradar, áreas potencialmente favorables para la prospección de las aguas subterráneas en la parte inferior de la cuenca hidrográfica Sabanalamar en Cuba oriental.

1.1. Características generales del sector de estudio

El sector de estudio se ubica (Figura 1) en la cuenca hidrográfica del río Sabanalamar en la provincia de Guantánamo, Cuba oriental. Abarca un área de 3,22 km². La Figura 2 muestra el trazado de los perfiles y la Tabla 1, las líneas levantadas con el georradar en el sector de estudio.

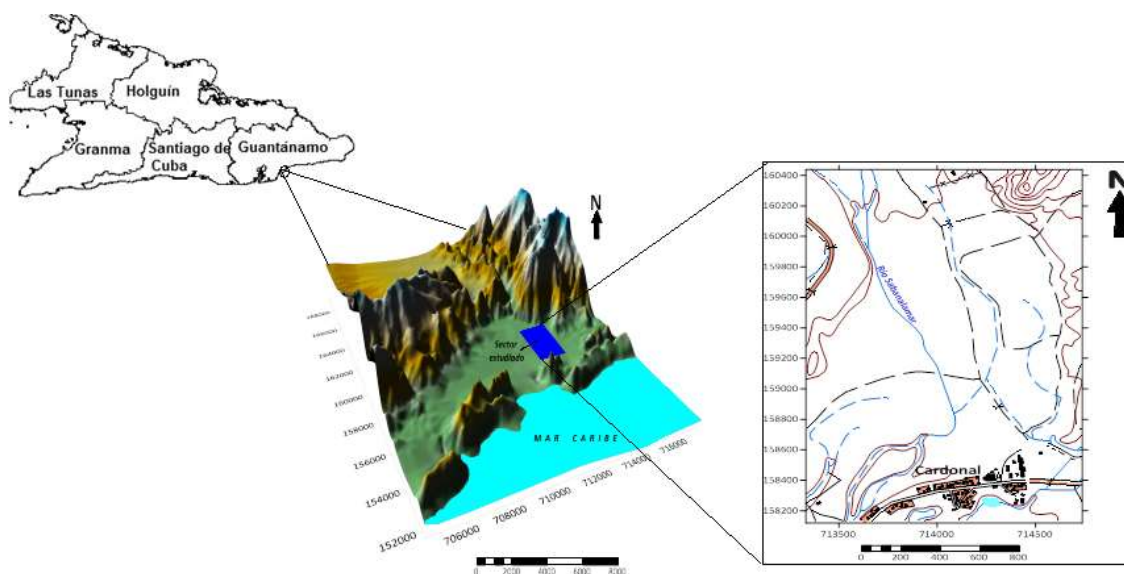


Figura 1. Ubicación geográfica del sector de estudio en la cuenca hidrográfica del río Sabanalamar, perteneciente a la provincia de Guantánamo, Cuba oriental.

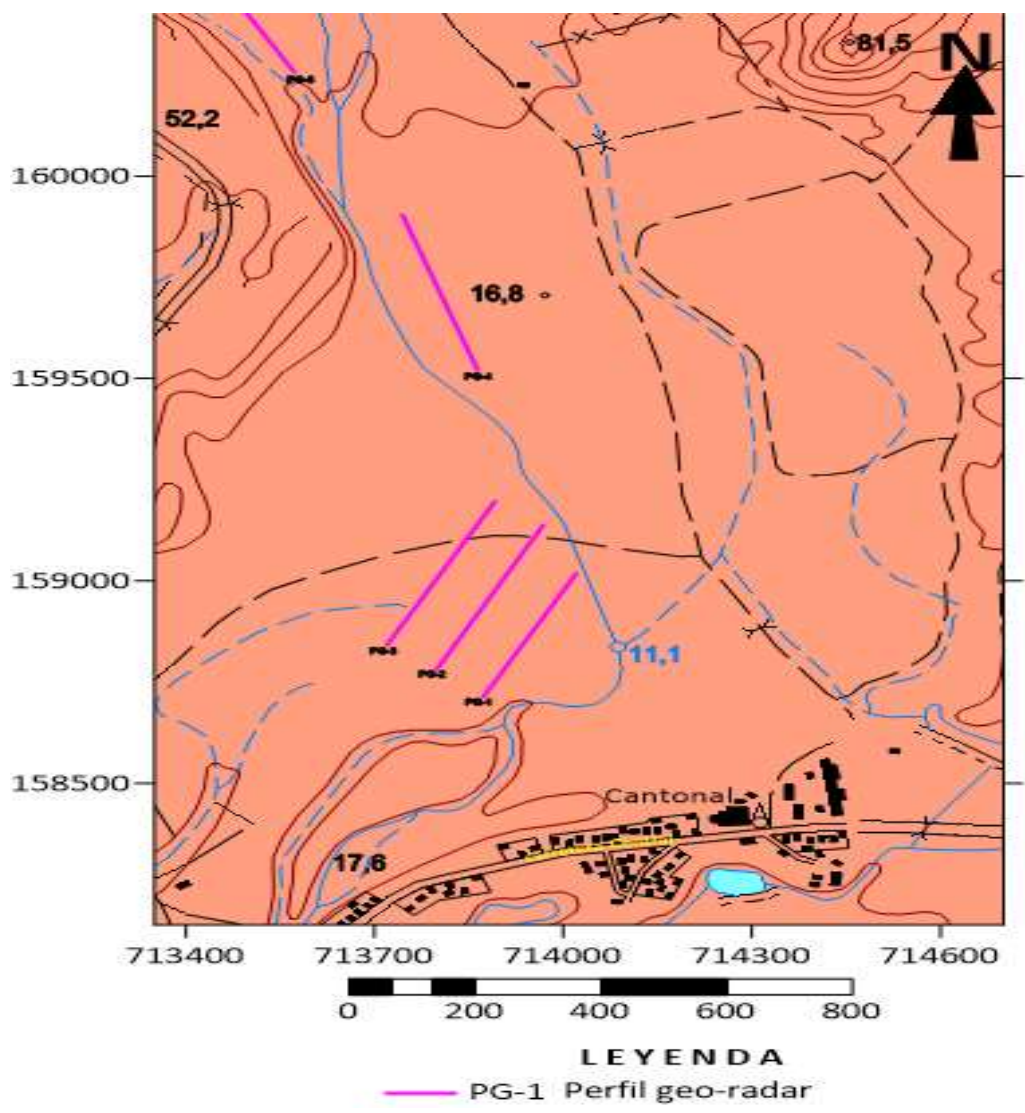


Figura 2. Trazado de los perfiles con el georadar, en el sector de estudio en la cuenca de Sabanalamar, perteneciente a la provincia de Guantánamo, Cuba oriental.

Tabla 1. Líneas levantadas con el georadar en el sector de estudio

Línea Georadar	Longitud (m)	Rumbo	Antena Utilizada (MHZ)
PG-1	340	SW-NE	100
PG-2	380	SW-NE	100
PG-3	400	SW-NE	100
PG-4	400	SE-NW	100
PG-5	400	SE-NW	100
TOTAL	1920	-	-

1.2. Características geológicas e hidrogeológicas del sector de estudio

La caracterización geológica del sector fue realizada a partir del mapa geológico digital (IGP, 2003) y su descripción (IGP, 2013):

Formación Río Sabanalamar (rsb): compuesta por guijarros, en ocasiones conglomerados débilmente cementados, con intercalaciones y lentes de arenas arcillosas, de color gris y gris amarillento. Edad: Pleistoceno Superior, parte baja (IGP, 2013).

La red hidrográfica está bien desarrollada, destacándose el río Sabanalamar que nace en la Sierra El Purial, descargando sus aguas en la bahía de Sabanalamar (mar Caribe). En periodo seco (estiaje) el caudal del río se deprime hasta que sus aguas corren subterráneamente por las terrazas aluviales.

Las características hidrogeológicas denuncian que se trata de una cuenca de tipo abierta, que el acuífero es sin presión, la yacencia de sus aguas subterráneas oscila entre 3,0 m -10,0 m, y la mineralización de las aguas es inferior a 1 g/l.

1.3. Hidrogeología

En el año 2021 la estación del Valle de Caujerí, la más cercana al área de estudio, reportó 527,2 mm de lluvia, siendo la menor cifra de las estaciones de la provincia, significando 476,9 mm por debajo de la media provincial y 601,5 menor que la media nacional (ONEI, 2021).

Las mediciones de profundidad del agua subterránea permitieron confeccionar el mapa de hidroisohipsas de la zona baja de la cuenca, ubicada en la parte norte de la Carretera Central que va hacia Imías y el este del vial que va hacia el valle de Caujerí (Figura 3).

El comportamiento de las hidroisohipsas corrobora la marcada influencia del relieve, los ríos y afluentes y depresiones del terreno existentes en la zona, disminución de la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas hacia el sur, que resulta ser la zona de descarga con dirección al río Sabanalamar.

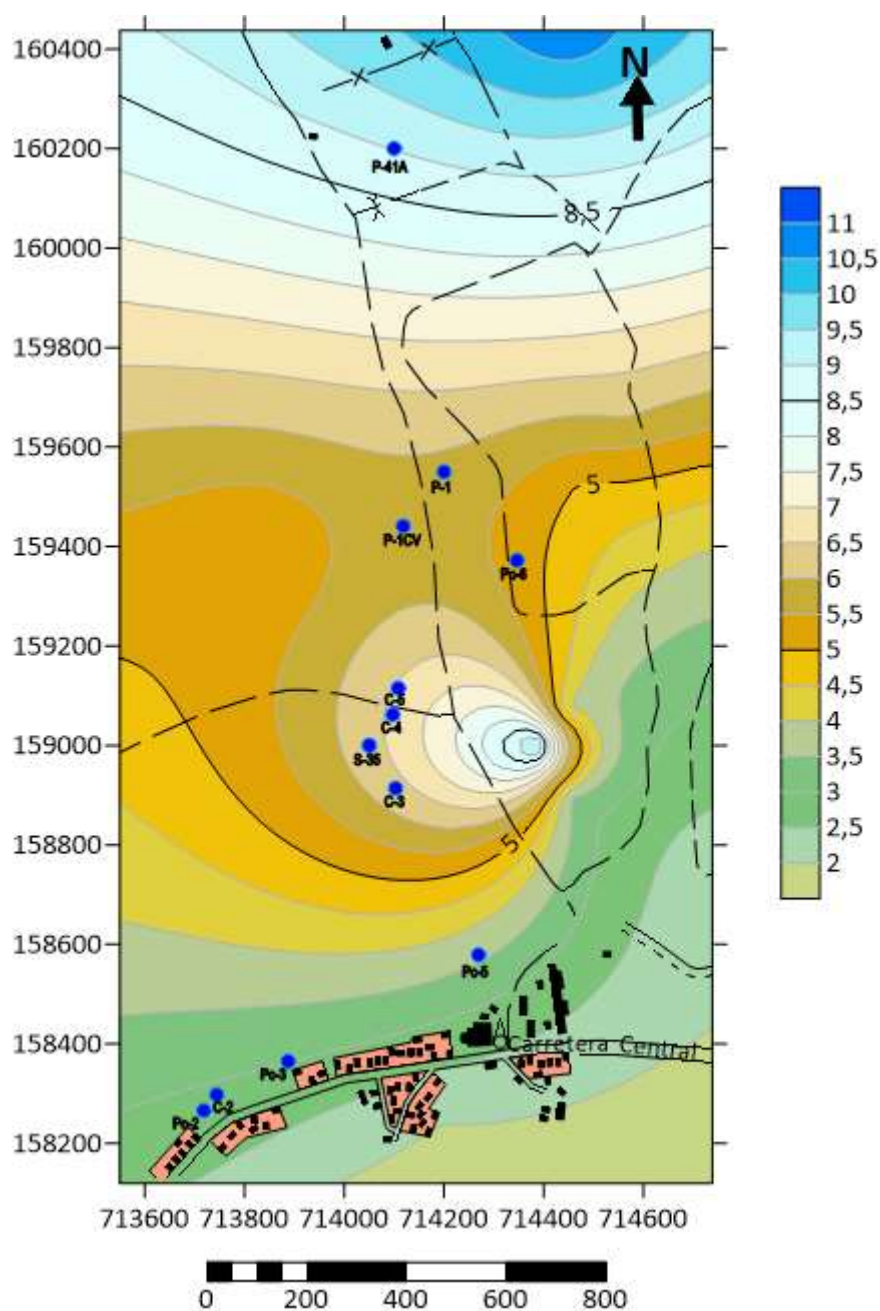


Figura 3. Mapa de hidroisohipsas con el flujo del agua. Los puntos azules representan los pozos realizados en el área.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como materiales se utilizaron los mapas y resultados derivados de las investigaciones precedentes. Primeramente, se recuperó la información disponible del área tal como, los resultados del levantamiento geológico de la región Oriental de Cuba, realizado por la brigada cubano-húngara y su mapa geológico a escala 1:100 000 del Instituto Cubano de Geología y Paleontología (IGP); el plano de ubicación del sector prospectado y registros de información geológica superficial. Luego, en campo, se efectuaron las

cinco líneas de georradar-GPR sobre el terreno para conocer las características del subsuelo a profundidad de hasta 10 m y en algunos casos hasta 15 m. Finalmente, en gabinete, se procesaron los radargramas obtenidos en campo, generando información filtrada, a partir de la cual pudo determinarse las características físicas del subsuelo, las condiciones geoestructurales, e inferir el comportamiento del subsuelo.

Fue consultado el informe de los trabajos geofísicos realizados en el proyecto Arena Sabanalamar (Dusack *et al.*, 2017), desarrollado en la propia cuenca de la provincia de Guantánamo, donde se concluye que el complejo de métodos empleado (Georradar y SEV), aportó importantes detalles a la investigación, como la definición de estratos con propiedades físicas contrastantes, lo que permitió establecer diferentes capas y la probable existencia de depósitos de arena.

Se empleó el método de georradar, internacionalmente conocido como GPR (por sus siglas en inglés, *Ground Penetrating Radar*), técnica de teledetección cercana y prospección no invasiva basada en la emisión de un pulso electromagnético de muy corta duración (1 ns -20 ns) caracterizado por una frecuencia nominal que puede oscilar entre los 10 MHz y los 2,5 GHz, según la antena seleccionada. Su objetivo final es obtener radargramas, pseudo-imágenes que se aproximan a una sección transversal del subsuelo bajo la línea de desplazamiento de las antenas, de modo similar a las obtenidas por los métodos clásicos de sismica de reflexión.

En este caso se utilizó la antena de 100 MHz de frecuencia del tipo RTA (*rough terrain antenna*), es una configuración *all on line*, donde transmisor y receptor se ubican en un mismo eje. Esta antena cumple con la relación profundidad de estudio (15 m) de modo que, cuanto mayor es la frecuencia, la profundidad de estudio es menor y precisión deseada, siempre que las características del perfil geológico sean favorables, con la posibilidad de detectar objetos de hasta 4 cm.

Para realizar las mediciones con el método georradar en el sector de estudio fue trazada una red poco uniforme según permitieron las condiciones topográficas del terreno. Se realizaron cinco perfiles, de ellos tres con dirección SW-NE, separados a una distancia aproximada de 95 m y dos con orientación SE-NW.

Una vez efectuado el procesamiento de los radargramas, se definieron los tipos de anomalías en estos. Las anomalías están representadas por: reflectores hiperbólicos (anomalías de tipo hiperbólico), que pueden constituir bloques de roca, cavidades, entre otras; reflectores lineales (horizontales, verticales, inclinados o curvos), que corresponden a las interfaces entre dos

medios de diferentes propiedades electromagnéticas e indican la presencia de diferentes capas, nivel freático, fracturas y fallas. Así también estos pueden indicar cavidades o removimientos del suelo y secuencia estratigráfica.

La captación del dato en todos los perfiles se realizó tomando una medición cada 0,50 m, aproximadamente, lo que permitió obtener una imagen continua del subsuelo con buena definición lateral y vertical del perfil geológico.

2.1. Parámetros y características importantes

2.1.1. Capacidad de penetración

Las ondas electromagnéticas pueden penetrar una distancia determinada antes de atenuarse. Tal distancia es la profundidad nominal de penetración ($1/\alpha$) y para cinco veces este valor se considera que el campo se ha atenuado por completo, aunque a efectos prácticos, la señal deja de recibirse antes (Cimadevila, 1994). En la Tabla 2 se recopilan valores típicos de permitividad relativa, conductividad, velocidad y factor de atenuación para una frecuencia de 100 MHz.

Tabla 2. Características de una onda para una frecuencia de 100 MHz (Milsom, 1996)

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Aire	1	0	0,30	0
Hielo	3-4	0,01	0,16	0,01
Agua dulce	80	0,5	0,033	0,1
Agua salada	80	3000	0,01	1000
Arena seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Arena húmeda	20-30	0,01-1	0,06	0,03-3
Limo	5-30	1-1000	0,7	1-100
Caliza	4-8	0,5-2,0	0,12	0,4-1
Granito	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1

Para el procesamiento e interpretación de la información obtenida con el método de georradar se utilizaron los siguientes programas: *Ramac GroundVision*, suministrado por la firma *Mala Geoscience*, Suecia. *Reflexw2D*, adquirido por *Geominera Oriente* a *Sandmeier Software*, Alemania y *Surfer v11*.

3. RESULTADOS

El radargrama de la antena de 100 MHz (Figuras 4 y 5) muestra claramente un reflector continuo a profundidad variable que se identifica como el contacto arcilloso-limoso y arcilloso-arenoso.

En las imágenes de los radargramas de los perfiles 1 y 2 (Figuras 4 y 5) se observan dos zonas con características bien definidas y contrastantes. En toda la extensión del perfil 1 (Figura 4) se aprecian reflexiones intensas que permiten identificar dos capas: la primera asociada a sedimentos arcilloso-limosos con velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas aproximadamente igual a 0,06 ns, que se representa con líneas de color azul; y la segunda capa asociada a arcilla-arenosas con gravas donde la velocidad de propagación de estas ondas se incrementa hasta alcanzar más de 0,160 ns, representada por líneas de color rojo y azul.

En este perfil en los primeros 40 m; desde 80 m hasta la 120 m; y desde 160 m hasta 200 m, se observan hipérbolas que pueden estar relacionadas con la presencia de fragmentos de rocas o arenas de mayor granulometría.

Estas características fueron plasmadas en el perfil de interpretación geológico-geofísico (Figura 4) donde se observan dos capas, la primera con un espesor variable asociado a la capa vegetal e intercalaciones de limos y arcillas, y la segunda capa de arcillas con arenas gravosas de potencia no mayor de 3,5 m.

Se cartografiaron numerosos agrietamientos o contactos litológicos, como se aprecia en la Figura 4 con líneas discontinuas.

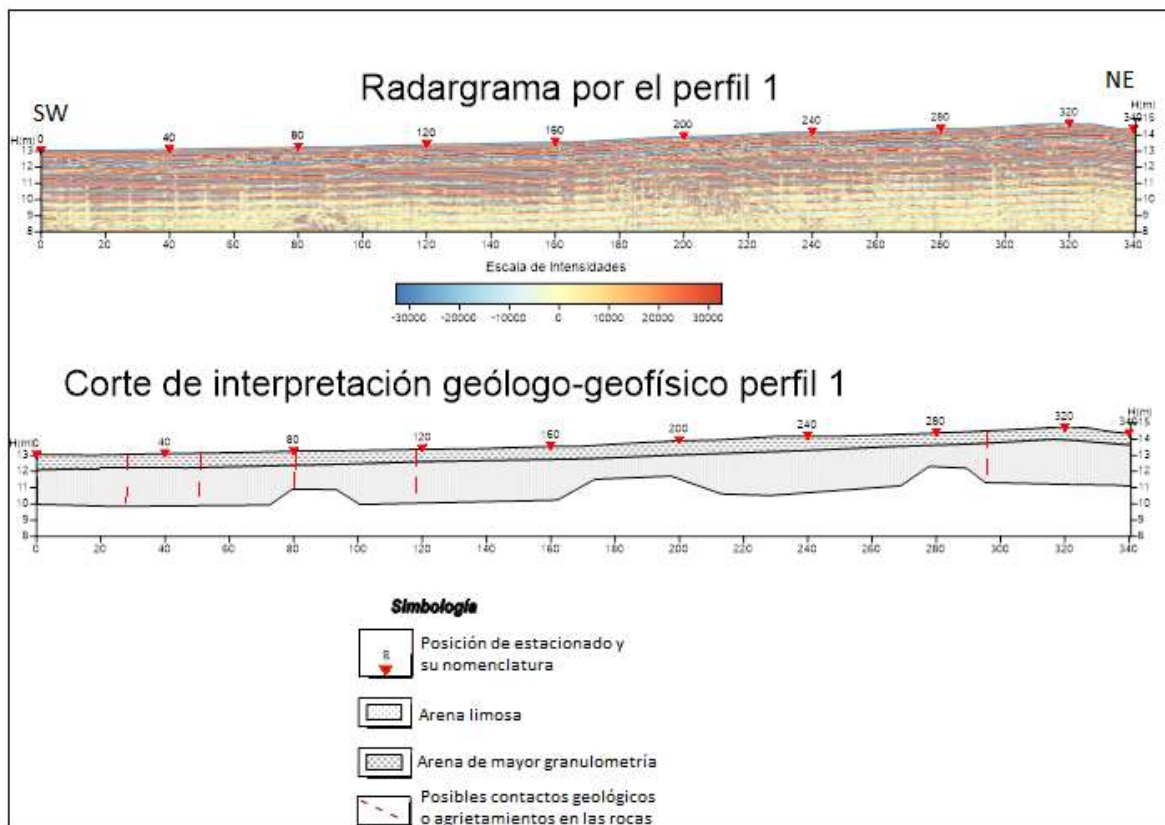


Figura 4. Radargramas e interpretación geológico-geofísica del perfil 1.

El perfil 2 (Figura 5) presenta las mismas características que el perfil 1. A lo largo de todo el perfil se aprecia en el radargrama reflexiones intensas que separan dos capas. El límite entre ambas capas se ha representado en color azul. El primer estrato se asocia a sedimentos limoso-arenosos, donde la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es de 0,06 ns, aproximadamente. Por debajo de esta capa, con reflexiones menos intensas y velocidad de las ondas electromagnéticas superiores a 0,160 ns, se define un estrato asociado a arena limosa con grava, representado por zonas de color rojo y azul. En este perfil, a partir de 130 m hasta la 240 m, se observan hipérbolas que pueden estar relacionadas con la presencia de fragmentos de rocas o arena limosa con gravas de mayor granulometría.

Los perfiles 3, 4 y 5 realizados en el sector de estudio dentro de la cuenca Sabanalamar presentan las mismas características que los dos anteriores.

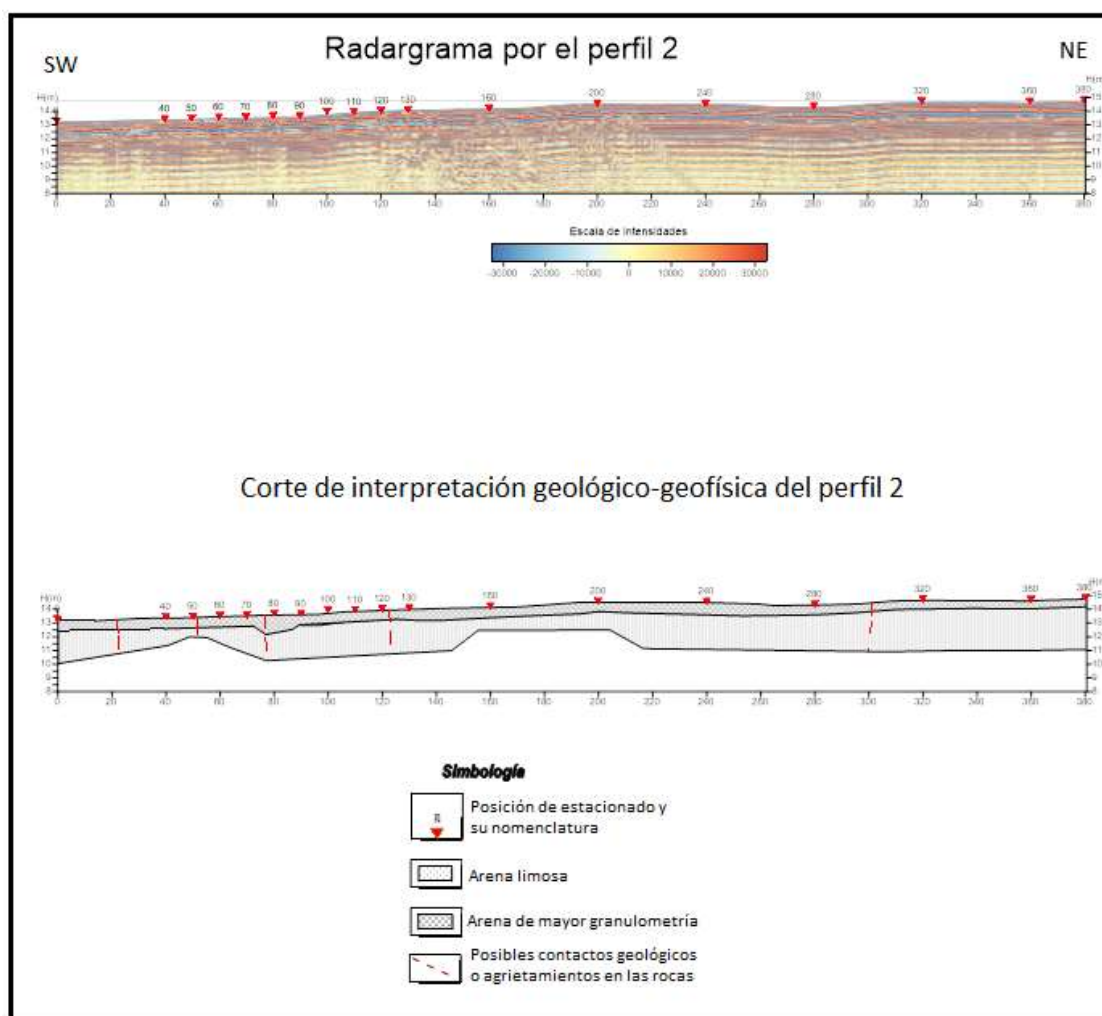


Figura 5. Radargramas y cortes de interpretación geológico-geofísica del perfil 2.

4. DISCUSIÓN

En la cuenca hidrográfica Sabanalamar, la utilización del método de georradar permitió resolver tareas hidrogeológicas en los entornos arenosos costeros, que incluye información sobre la secuencia estratigráfica, así como la detección y profundidad del nivel freático y el manto rocoso. Con la antena de 100 MHz se logra una mayor penetración para definir las interfaces de arcilla-limosas con arcilla-arenosa de mayor granulometría; se logró determinar, además, el espesor de cada capa. El nivel freático es visible en los radargramas, debido a la alta porosidad del volumen de la arcilla-arenosa con mayor porcentaje de gravas.

Al comparar los resultados de los radargramas con las mediciones efectuadas para determinar el nivel freático de algunos pozos presentes en el área se determinó que la profundidad del nivel freático oscila entre 3,0 m y 4,0 m.

Es necesaria la ejecución de otras investigaciones geofísicas (métodos de Tomografía Eléctrica, Sísmica de Refracción y SEV paramétrico en pozos) para la determinación del avance de la intrusión marina.

Cuando se realizan mediciones con el georradar debe mantenerse al margen de la influencia del agua salada del mar, cuya presencia modifica drásticamente las propiedades electromagnéticas del suelo, provocando la atenuación total de la señal.

5. CONCLUSIONES

- La variación de la onda electromagnética y su velocidad puede estar relacionada con la variación de la constante dieléctrica del área, estando influenciada por la humedad y la porosidad del material presente en la zona, sobre todo en la frontera arcilla-limosa y arcilla-arenosa con gravas de mayor granulometría, donde se observa un incremento de la velocidad de las ondas electromagnéticas.
- La adquisición de los datos con el georradar permite caracterizar el corte geológico con una alta precisión, aportando información sobre la secuencia estratigráfica, así como la detección y profundidad del nivel freático y el manto rocoso.
- Comparando los resultados de los radargramas con las mediciones del nivel freático de algunos pozos presentes en el área se determina que la profundidad del nivel freático oscila entre 3,0 m y 4,0 m.
- Se propone como áreas potencialmente favorables para la prospección de las aguas subterráneas las más al oeste del sector objeto de estudio.

6. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a Geocuba Oriente Sur, Empresa Geominera Oriente ubicadas en la ciudad de Santiago de Cuba y a Geocuba Oriente Norte, en la ciudad de Holguín, por la colaboración en la realización de este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Acosta, J. & Dussac, O. (2016). Trabajos geofísicos realizados en el proyecto Arena Malabè. Informe técnico. Fondos de la Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Annan, A. P. (2003). *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Inc, Mississauga.
- Biskup, K., Lorenzo, H., Arias, P. (2005). Aplicabilidad del radar de subsuelo para el estudio de la zona no saturada del suelo: ejemplos en ambientes

- arenosos costeros. VII Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo: ZNS05, 197-204.
- Carcione, J., Géza, S., Davide, G. (2003). Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics*, 52(4), 177-191.
- Cimadevila, L. (1994). *Prospección geofísica de alta resolución mediante georradar. Aplicación a obras civiles*. (Tesis, Universidad Complutense de Madrid).
- Dussac, O., Allen, J., Carmenaty, E. (2017). informe de los trabajos geofísicos realizados en el proyecto Arena Sabanalamar. Fondos de la Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- García, F., Canas, J., Clapes, J., Osorio, R., Pujades, L. (1996). Aplicaciones de Georradar para determinar oquedades en el futuro emplazamiento de las pilas de sostenimiento de un viaducto. *Geogaceta*, 20(6).
- Hernández, A. (2017). *Métodos Geofísicos para la Determinación de Características de Acuíferos para su Recarga Artificial mediante Lagunas de Infiltración*. (Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México).
- Instituto de Geología y Paleontología IGP. (2003). *Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Instituto de Geología y Paleontología IGP. (2013). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana: Servicio Geológico de Cuba. Ministerio de Energía y Minas.
- Lapazaran, J. (2004). *Técnicas de procesamiento de datos de georradar y su aplicación al estudio del régimen termodinámicos de los glaciales frío y politérmicos*. (Tesis doctoral, Universidad politécnica de Madrid, España).
- Milsom, J. (1996). *Field Geophysics*. John Wiley & sons.
- ONEI. (2021). *Panorama Ambiental. Cuba 2021*. Edición 12 agosto 2022. Oficina Nacional de Estadísticas e Información, La Habana, 7 pp.
- OSDE Gestión Integrada de las Aguas Terrestres (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Guantánamo. (2023). Informe técnico para la propuesta de rediseño de la red hidrogeológica provincia Guantánamo. Fondos de Recurso Hidráulico.

- Rosabal, S., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Medina, J. (2024a). Estudios Ingeniero Geológico punto crítico Alto de Covita, La Farola, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Rosabal, S., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Medina, J. (2024b). Estudios Ingeniero Geológico punto crítico Alto de Covita¹, La Farola, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Rosabal, S., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Medina, J. (2024c). Estudios Ingeniero Geológico punto crítico Sabaneta, La Farola, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Rosabal, S., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Medina, J. (2024d). Estudios Ingeniero Geológico punto crítico Alto de Cotilla, La Farola, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Ruffell, A. & Parker, R. (2021). Water Penetrating Radar. *Journal of Hydrology*, 597, 126300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126300>.
- Schwarck, C., Baena, G., y Zambrano, O. (2020). Estudio hidrogeofísico del sector Papelón, Zona Rural de El Hatillo, estado Miranda, Venezuela. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 11(2), 8-18.
- Socorras, M., Oliva, R., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Grimany, G., Medina, J. (2021a). Estudios Ingeniero Geológico para la ubicación de viviendas en El Paraíso, Baracoa, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Socorras, M., Oliva, R., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Grimany, G., Medina, J. (2021b). Estudios Ingeniero Geológico para la ubicación de viviendas en El Jamal, Baracoa, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Socorras, M., Oliva, R., Manual, J., Guerra, Y., Ruiz, M., Grimany, G., Medina, J. (2021c). Estudios Ingeniero Geológico para la ubicación de viviendas en Yumurí, Baracoa, Guantánamo. Fondos de Geocuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba.
- Soldi, M. (2020). *Modelos de flujo de agua y de exceso de densidad de carga en medios porosos de saturación variable*. (Tesis doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Argentina).
- Tavera, M. (2008). *Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hídrica*. (Tesis de maestría, Universidad politécnica de Valencia, España).

Zhang, M., Feng, X., Bano, M., Xing, H., Wang, T., Liang, W., Zhou, H., Dong, Z., An, Y., Zhang, Y. (2022). Review of Ground Penetrating Radar Applications for Water Dynamics Studies in Unsaturated Zone. *Journals Remote Sensing*, 14(23), 5993. <https://doi.org/10.3390/rs 14235993>.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

JIMH: Interpretación de datos, redacción, revisión, confección de los perfiles de georradar, diseño de los perfiles de georradar, aprobación de la versión final. JMC: Procesamiento e interpretación de datos. SRD: Redacción y corrección del informe.

ORCID

JIMH, <https://orcid.org/0009-0000-5935-5314>

JMC, <https://orcid.org/0009-0007-0239-4057>

SYRD, <https://orcid.org/0000-0002-1233-1101>

Recibido: 11/01/2025

Aprobado: 05/03/2025