

## Aplicación de los métodos geofísicos georradar y tomografía eléctrica, en el estudio de taludes. Casos de estudio: Zona Especial de Desarrollo Mariel y Castillo de Santo Domingo de Atarés, Cuba

Melissa Pérez Barzaga<sup>1</sup>, Orlando R. Carraz Hernández<sup>2</sup> y Claudia Blanco Concepción<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera Geofísica. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, INVESCONS, calle 100 N° 9107, entre Vento y 16, Altahabana, Boyeros. La Habana. ORCID ID 0000-0001-9123-3464. Correo Electrónico: melissapb97@gmail.com.

<sup>2</sup> Ingeniero Geofísico. Máster en Geofísica Aplicada. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular e Investigador Titular. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría». ORCID ID 0000-0001-6866-061X. Correo Electrónico: orlando@civil.cuje.edu.cu.

<sup>3</sup> Ingeniera Geofísica. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, INVESCONS, calle 100 N° 9107, entre Vento y 16, Altahabana, Boyeros. La Habana. ORCID ID 0000-0001-4906-4852. Correo Electrónico: claudia@enia.co.cu

### RESUMEN

La investigación surge por la necesidad de explicar el comportamiento interno de los taludes en la Zona Especial de Desarrollo (ZED) Mariel, Zona A5, vial RIMCO en la provincia de Artemisa y en el Castillo de Santo Domingo de Atarés en la provincia La Habana, Cuba, con condiciones geológicas complejas y peligro de deslizamientos de masa rocosa. Con el objetivo de analizar las causas y prevenir desastres mayores, se ejecutaron investigaciones geofísicas mediante los métodos Georradar y Eléctricos con la variante de Tomografía Eléctrica y distintos arreglos electródicos. Las técnicas geofísicas de alta resolución ejecutadas, son ampliamente utilizadas en estudios geotécnicos de esta naturaleza, al generar imágenes continuas del perfil geológico con una elevada resolución. En el trabajo se demuestra la eficiencia de los métodos empleados en la caracterización interna de dichos taludes y se detectan probables superficies de fallas que pueden estar afectando los mismos. Los resultados alcanzados fueron comparados con la información de las perforaciones y los perfiles geológicos ya existentes y mues-

tra una alta correlación con los resultados de la geofísica. Por último, se obtuvo un modelo geológico a partir de los resultados geofísicos los cuales permitieron esclarecer cómo se comportan ambos taludes para la detección temprana de posibles deslizamientos. Esto demuestra cuán eficientes y útiles pueden llegar a ser el empleo y uso adecuado de dichas técnicas no invasivas en el campo de la ingeniería civil.

**Palabras clave:** Deslizamiento, taludes, tomografía eléctrica, georradar.

### ABSTRACT

The research arises from the need to explain the internal behavior of the slopes in the Mariel Special Development Zone, Zone A5, RIMCO road in the province of Artemisa and in the Castillo de Santo Domingo de Atarés in the province of Havana, Cuba; with complex geological engineering conditions and danger of rock mass landslides. In order to analyze the causes and prevent major disasters, geophysical investigations were carried out using the Georradar and Electrical methods

with the Electrical Tomography variant and different electrode arrangements. The high resolution geophysical techniques are widely used in geotechnical studies of this nature, by generating continuous images of the geological profile with high resolution. The work demonstrates the efficiency of the methods used in the internal characterization of these slopes and probable fault surfaces that may be affecting them are detected. The results achieved were compared with the information from the existing drilling and geological profiles, showing a high correlation with the geophysical results. Finally, a geological model was obtained from the geophysical results which allowed to clarify how both slopes may be behaving for the early detection of possible landslides. This shows how efficient and useful the proper use and use of these noninvasive techniques can be in the field of civil engineering.

**Key Words:** Landslides, slopes, georadar, electrical tomography

## RESUMO

A pesquisa surge da necessidade de explicar o comportamento interno das encostas na Zona Especial de Desenvolvimento de Mariel, Zona A5, estrada RIMCO na província de Artemisa e no Castillo de Santo Domingo de Atarés na província de Havana, Cuba; com condições complexas de engenharia geológica e perigo de deslizamentos de massa rochosa. A fim de analisar as causas e prevenir grandes desastres, investigações geofísicas foram realizadas utilizando os métodos Georadar e Elétrico com a variante de Tomografia Elétrica e diferentes arranjos de eletrodos. As técnicas geofísicas de alta resolução são amplamente utilizadas em estudos geotécnicos desta natureza, por gerar imagens contínuas do perfil geológico com alta resolução. O trabalho demonstra a eficiência dos métodos utilizados na caracterização interna dessas encostas e são detectadas prováveis superfícies de falhas que podem estar afetando-as. Os resultados obtidos foram comparados com as informações dos perfis geológicos e de sondagem existentes, mostrando uma alta correlação com os resultados geofísicos. Por fim, um modelo geológico foi

obtido a partir dos resultados geofísicos que permitiram esclarecer como ambas as encostas podem se comportar para a detecção precoce de possíveis escorregamentos. Isso mostra o quão eficiente e útil o uso adequado e o uso dessas técnicas não invasivas podem ser no campo da engenharia civil.

**Palavras chave:** Deslizamentos, encostas, tomografia eléctrica, georadar

## INTRODUCCIÓN

En la práctica geotécnica es común la exploración del terreno mediante técnicas de perforación, ya sea por percusión y lavado o por rotación, procedimientos que son bastante costosos. En muy pocos proyectos se utilizan las técnicas de prospección geofísica, debido, al desconocimiento de esta valiosa herramienta. El diseño de obras de infraestructura demanda técnicas de generación de información del subsuelo, eficientes en términos de calidad de la información, 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 (Arias *et al.*, 2012).

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como canales, caminos y ferrocarriles, así como el impulso de la construcción de presas de tierra, el cuidado de obras de carácter industrial e histórico, han puesto al diseño, estudio y construcción de taludes, en un plano de importancia ingenieril de primer orden. Tanto por el aspecto como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año. Sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. Todo esto debería ser considerado por las instituciones pertinentes a la hora de elaborar un plan de desarrollo y ordenamiento territorial y controlar su ejecución y cabal cumplimiento (Guzmán, 2019).

Cuba, ubicada en una región de clima subtropical, son frecuentes los eventos meteorológicos extremos, los que en ocasiones provocan grandes acumulados de lluvia, incrementando el contenido de agua en la masa de suelos o rocas, disminuyendo la fuerza de atracción entre las partículas y de una forma más general, su resistencia a esfuerzos cortantes o de cizalla (Tabares, 2015).

Desde los años 70, del siglo pasado, la comunidad de geofísicos y geólogos, ha comenzado a emplear, junto con otras técnicas, métodos geofísicos para caracterizar y monitorear los deslizamientos en taludes (Pazzi *et al.*, 2019).

Las técnicas de geofísica aplicada están orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante la medición de parámetros físicos asociados a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica y/o la velocidad de las ondas electromagnéticas. Los métodos geofísicos son útiles cuando existen contrastes bien definidos entre las propiedades de los materiales del subsuelo y se utilizan para cartografiar horizontes del suelo y la posición del nivel freático y del basamento. La profundidad de penetración y la resolución de estos métodos, varían en dependencia del equipo que se utilice y de las condiciones del terreno. En la investigación geotécnica los métodos de exploración geofísica han de ser utilizados en combinación con la observación directa en campo y las perforaciones, los primeros son muy útiles como guía para determinar la ubicación de las perforaciones (Arias *et al.*, 2012).

Los esfuerzos de este estudio van encaminados al empleo de los métodos de Tomografía Eléctrica y Georradar, en los trabajos relacionados con los taludes en la ZED Mariel, Zona A5 provincia de Artemisa y en el Castillo de Santo Domingo de Atarés, La Habana, en el municipio de la Habana Vieja. Ambos lugares están relacionados con el desarrollo económico y la historia de Cuba.

**Caso de estudio ZED Mariel, Zona A5, vial RIMCO**  
Se encuentra ubicado en el municipio de Artemisa, en la Zona Especial de Desarrollo Mariel específicamente en

la Zona A5, en uno de los viales que la conforman (**Figura 1**). El talud, el cual se aprecia en la (**Figura 2**) es aproximadamente 210 m de longitud y un espesor variable, desde 1 m al sur hasta 18 m en otros puntos. Se construyó utilizando voladura controlada para excavar la parte rocosa y equipos convencionales para las zonas que no se pudieron volar. Los trabajos de excavación avanzaron progresivamente de este a oeste hasta conformar el talud actual (González, 2018).

En el área de estudio se encuentra la Formación Peñalver del Paleógeno, cubriendo la Formación Vía Blanca del Cretácico. Ambas formaciones geológicas presentan un alto grado de tectonismo debido a los procesos geológicos intensos que las afectaron, como los movimientos entre la placa caribe y la norteamericana, al norte, que provocaron fallas geológicas, sistemas de fisuras y superficies de sobrecorrimientos (González, 2018).

La Formación Vía Blanca, está compuesta por intercalaciones de argilitas, areniscas, limolitas, conglomerados, calcarenitas, calizas, etc., desde poco espesor hasta varios metros. La Formación Peñalver, es una secuencia clástico-calcárea que varía desde conglomerados y gravelitas de grano grueso en la base hasta calcilutitas en la parte superior de la formación.

## **Caso de estudio 2. Castillo de Santo Domingo de Atarés**

El Castillo de Santo Domingo de Atarés (**Figura 3**) construido en 1763 constituye una de las fortificaciones más importantes de la capital cubana y forma parte del segundo sistema defensivo de la ciudad. Se ubica exactamente en Fábrica entre Arroyo y Avenida de Gancedo, en el municipio

La Habana Vieja al margen sureste de la bahía y al sur del municipio, sobre un promontorio que se eleva 29 metros sobre el nivel del mar llamado Loma de Soto.

La fortaleza se encuentra enmarcada sobre dos formaciones geológicas, primeramente, la Formación Peñalver, la cual está compuesta por una secuencia clástico-calcárea, que varía desde gravelitas de grano grueso (parte baja) hasta calcilutitas de grano muy

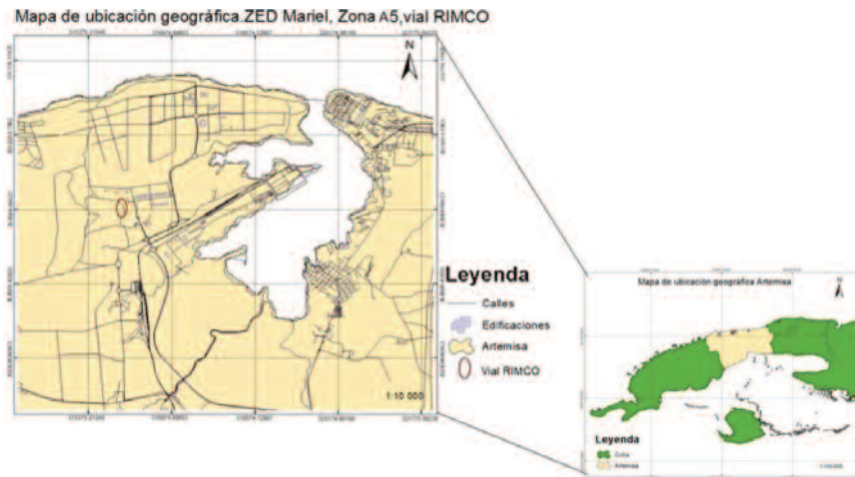


Figura 1. Situación geográfica del talud (Elaboración de los autores).

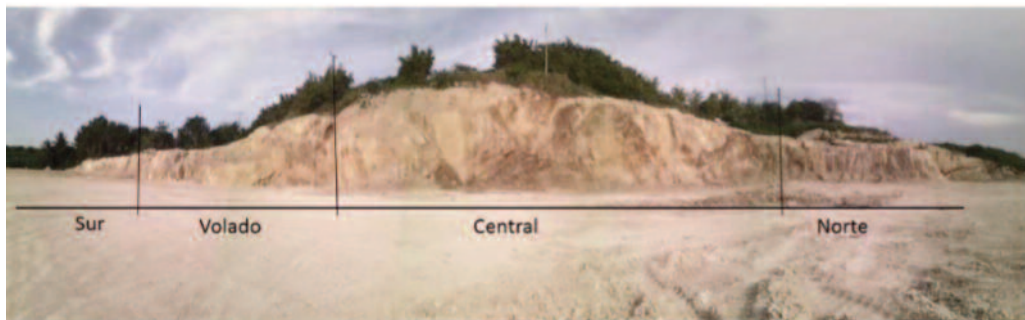


Figura 2. Vista general del talud con los tramos de estudio (González, 2018).



Figura 3. Situación geográfica del Castillo de Atarés (Elaboración de los autores).

fino (parte alta). El material clástico es en gran parte carbonatado y organógeno y en menor cantidad, ígneo. En la parte media del corte de esta unidad, en las capas de calcarenitas, en algunas localidades, se encuentran incluidos fragmentos orientados de material carbonoso, se presenta en forma de un sustrato plegado. Además, se encuentra la Formación Vía Blanca la cual litológicamente está formada por una secuencia *flyschoide* constituida por argilitas, limolitas y areniscas, de composición grauváquica, de color rojizo-verdoso y pardusco, con intercalaciones finas de margas blancas. Aparecen capas de conglomerados polimícticos en diferentes niveles, con matriz arenosa y arcilloarenosa, calizas detríticas, arcillas y tufitas (Hernández, 2019)

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Los métodos para ejecutar la evaluación geotécnica de los taludes son diversos como SPT, DPSH y corte directo, pero en este caso se empleó la prospección geofísica la cual se torna una herramienta rápida, económica y de ejecución sencilla en comparación con otros medios de investigación del subsuelo. Para abarcar las dos áreas de estudio se ha previsto utilizar dos métodos geofísicos: tomografía eléctrica y georradar.

La tomografía eléctrica utiliza la medida de las resistividades de los materiales geológicos subsuperficiales para determinar su espesor y profundidad. Se usan diferentes configuraciones de electrodos, dispuestos a lo largo de una línea con un espaciado constante, de tal manera que cuando las medidas de resistividad se realizan entre electrodos próximos, la profundidad de investigación es pequeña, pero cuando se realiza entre electrodos muy separados, la profundidad de investigación es mayor. De esta forma se obtiene un perfil bidimensional de los valores de resistividad según una malla uniforme. El espaciado entre electrodos también condiciona la resolución y la profundidad de investigación. Si el espaciado es pequeño, la profundidad de penetración disminuye y la resolución de los datos aumenta. Los valores de resistividad obtenidos en la prospección

eléctrica, son interpretados mediante un software específico, que permite determinar la geometría y los espesores de las unidades con diferentes resistividades mediante un proceso iterativo de inversión (Ortiz *et al.*, 2007)

El georradar, se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas, capaz de reproducir imágenes del subsuelo y deducir el material presente bajo la superficie. Es un método electromagnético de reflexión de alta frecuencia cuando las ondas encuentran un contraste dieléctrico y se reflejan hacia la superficie (ley de Snell-Descartes). Las propagaciones de las ondas a través del terreno están regidas por las ecuaciones de Maxwell y dependen de las propiedades dieléctricas, y en especial, de las heterogeneidades que encuentran al propagarse las ondas, las cuales en el medio geológico tienen influencia de las características del terreno, tales como: la matriz de sus materiales, su porosidad y contenido de agua. El georradar contiene una unidad emisora, una unidad receptora y una unidad de registro, con base en el tiempo de retardo de la onda reflejada y la velocidad de propagación de la onda en la superficie, a través de la cual se deslizan antenas, se deduce la profundidad hasta donde se encuentra el objeto reflector. Su funcionamiento consiste en la emisión de ondas con una determinada frecuencia, con el fin de detectar las reflexiones producidas por el objeto de interés. La incidencia de la energía en las heterogeneidades del subsuelo genera reflexiones, refracciones y difracciones de las ondas, las cuales son captadas por una antena receptora que recibe la energía electromagnética tras su propagación por el medio. Las constantes que definen electromagnéticamente un medio son la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética (Benítez 2007).

La selección de estos métodos se basa en los factores que afectan los parámetros eléctricos (resistividad eléctrica y permitividad dieléctrica) y su extrema variabilidad espacio temporal. Estos parámetros están muy influidos por la mineralogía de las partículas, el contenido de agua, la naturaleza del electrolito, la porosidad y los procesos de meteorización y alteración de las rocas.

## Proyección y ejecución de los trabajos

### Caso de estudio 1

Con la finalidad de dar solución a la tarea técnica emitida por el Grupo de Proyecto e Ingeniería del Mariel, se realizó una visita de reconocimiento al talud, por parte de los especialistas geofísicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) para conocer las características del área de estudio y así proyectar la adquisición más factible a ejecutar.

Previo a los trabajos geofísicos, en el área se realizaron 7 calas en el vial, las cuales llegaron a profundidades entre 7 y 17 m y la información de la misma, se empleó para la posterior interpretación y además se llevó a cabo un levantamiento topográfico del área, para ubicar los trabajos geofísicos.

Para abarcar el área de estudio se proyectó utilizar dos métodos geofísicos: tomografía eléctrica y georradar. La toma de datos se planificó de la siguiente manera (Figura 4):

Tres perfiles de Tomografía Eléctrica, dos de 120 m de longitud en el tramo central del talud, con un espaciamiento entre electrodos de 3 m y separación entre ambos de 5 m y un perfil en el tramo volado de 100 m y espaciamiento entre los electrodos de 2.5 m.

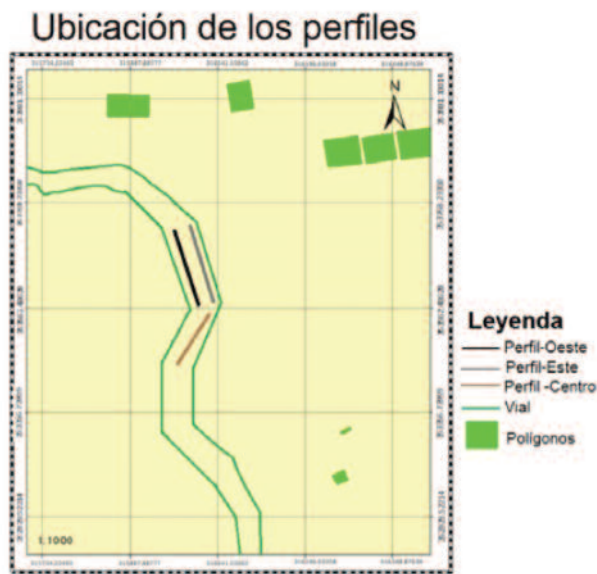


Figura 4. Ubicación de los perfiles geofísicos (Elaboración de los autores).

Además, se decidió utilizar las configuraciones dipolo-dipolo, polo-dipolo y gradiente múltiple.

Dos perfiles de Georradar de 170 m que coinciden en su inicio y hasta los 120 m con los perfiles proyectados de Tomografía Eléctrica en el tramo central. La antena a utilizar será la de 160 MHz.

En la ejecución de los trabajos se mantuvo la proyección planificada para la Tomografía Eléctrica. Se realizaron dos perfiles en el tramo central de 120 m de longitud, cada uno con un espaciamiento entre electrodos de 3 m y una separación entre ambos perfiles de 5 m. En el tramo volado se realizó un perfil central de 100 m de longitud, con un espaciamiento entre electrodos de 2.5 m, todos con una orientación sur-norte, en estos perfiles se emplearon las configuraciones dipolo-dipolo, polo-dipolo y gradiente múltiple.

Para el caso del georradar la toma de datos se realizó a lo largo de dos líneas que coinciden con los dos perfiles de tomografía eléctrica que se ejecutaron en el tramo central, midieron 170 m de longitud y abarcaron el tramo central y 50 m del tramo norte y se empleó una antena de 160 MHz.

### Caso de estudio 2

Este trabajo de investigación se lleva a cabo, respondiendo a la Tarea Técnica emitida por la Oficina de Proyectos de la Dirección Habana Colonial, de la Oficina del Historiador. El objetivo es, explicar el comportamiento del relleno, suelos y rocas que se encuentran en la elevación donde se enclava el Castillo de Atarés, así como las posibles causas de los problemas observados en muros y viales. Para proyectar dicha adquisición se realizó una inspección al área de interés. En los muros exteriores del Castillo se apreció que presentan grietas y desplomes en algunas secciones. Además, las calles que lo bordean se encuentran agrietadas en varios puntos.

Por la apreciación de los fenómenos observados en la inspección realizada y dada las dificultades para la ejecución de calas en algunas partes del área de interés, se proyectó realizar un estudio del talud con la aplicación de dos métodos geofísicos: tomografía eléctrica y georradar.

Un factor importante que se debió contemplar para la ejecución de este trabajo, fue el escaso tiempo que se tenía para realizar el estudio, las condiciones de la zona de estudio y la extensa área que se debía cubrir, por lo que se decidió ejecutar dos perfiles de tomografía eléctrica y dos perfiles de Georradar y que los mismos coincidiesen en ambos métodos (**Figura 5**). La toma de datos se planificó de la siguiente manera:

- Dos perfiles de Tomografía Eléctrica con espaciamiento entre electrodos de 2 m y emplear las configuraciones Wener, dipolo-dipolo y gradiente múltiple.
- Dos perfiles de Georradar utilizando las antenas de 50 MHz y 450 MHz.

En los trabajos se realizó solo un perfil de tomografía eléctrica, por disponer de poco tiempo y las inclemencias del tiempo que hubo ese día. Este se situó en el perfil 1 proyectado y tuvo extensión de 80 m de longitud y un espaciamiento entre electrodos de 2 m, donde las configuraciones utilizadas fueron dipolo-dipolo y gradiente múltiple.

En el caso del método de georradar se ejecutaron dos perfiles, se emplearon dos antenas, primero la

de 50 MHz para llegar a mayores profundidades y luego se empleó la de 450 MHz para detallar la parte superior del corte.

Los *softwares* utilizados en el procesamiento son el Reflex2D y el Res2DInv para el caso del Georradar y la Tomografía Eléctrica, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caso de estudio 1

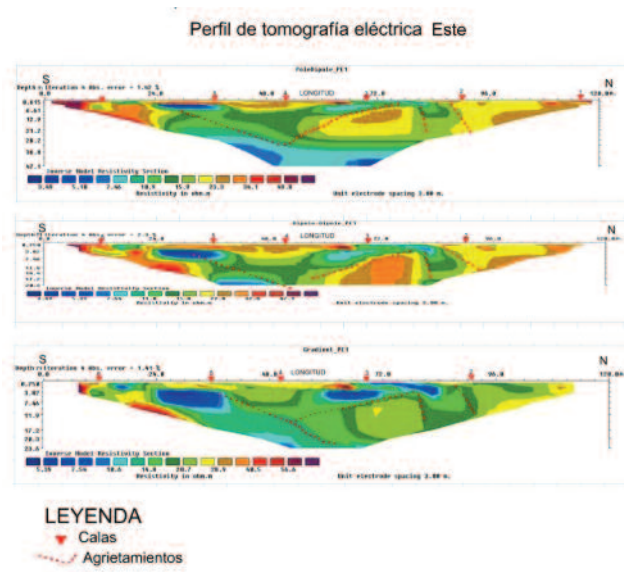
A partir del análisis e integración de los resultados geofísicos junto con la información brindada de las calas, se llegó a los siguientes resultados: tomografía eléctrica

Interpretación del perfil de tomografía eléctrica Este: Las formaciones predominantes en el área, Peñalver y Vía Blanca, ambas de rocas sedimentarias, se caracterizan por valores de resistividad eléctrica relativamente bajos y con un sistema de agrietamientos bastante marcado en el corte (**Figura 6**) que se evidencia también en el perfil geológico que se encuentra al descubierto en dicho talud.

En ese corte los colores amarillo y marrón, con resistividades entre 20 y 30  $\Omega\text{m}$ , se encuentran menos afectadas por los procesos tectónicos y de meteorización en la zona se asocian a rocas areno-limosas poco cementada. Las dos zonas anómalas de bajas resistivi-



**Figura 5.** Perfiles geofísicos. Caso de estudio 2 (Elaboración de los autores).



**Figura 6.** Tomografías eléctricas del perfil Este de las tres configuraciones ejecutadas (Elaboración de los autores).

dades, que se encuentran entre los 2 y 7 m de profundidad asociada a la imagen de tomografía eléctrica, de la configuración dipolo-dipolo, se relacionan al mismo proceso tectónico que está ocurriendo cerca, además se identifican agrietamientos (líneas discontinuas) que debilitan las rocas y crean espejos de fricción y fisuras.

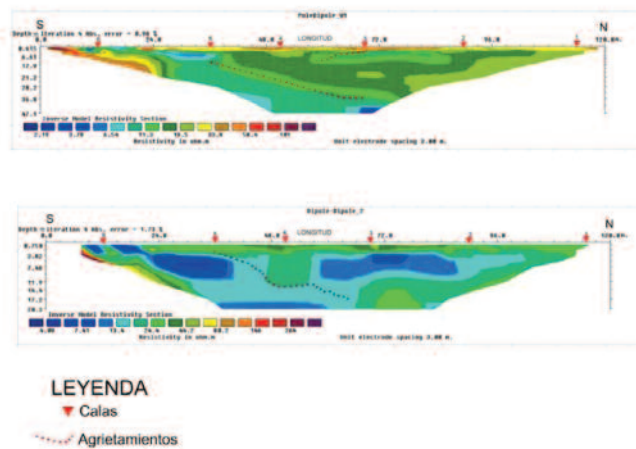
Por último, entre los 28 a 30 metros se ubica la mayor zona de debilitamiento de dicho talud, se puede inferir que esté relacionada con un contacto de dos formaciones (Formación Peñalver y Vía Blanca). Esto se corroboró en la vista del tramo central del talud, en la cual igual se identifican ambas formaciones, ubicándose Peñalver encima de Vía Blanca.

**Interpretación del perfil de tomografía eléctrica Oeste:**

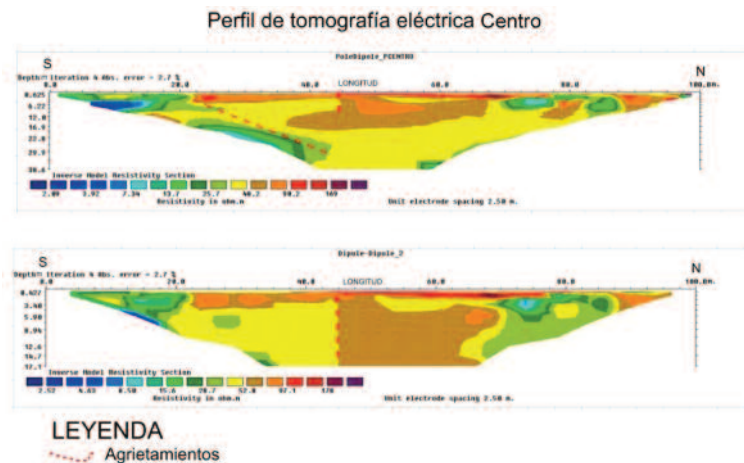
El siguiente perfil (**Figura 7**) a pesar de estar alejado de la zona expuesta a la meteorización, presenta resistividades más bajas en el orden entre los 10 y 20  $\Omega m$ , representan casi la totalidad de la sección analizada, por lo que se infiere que, en el interior del talud, hacia el oeste, la estructura del mismo es débil y presenta agrietamientos en el corte. Todas estas características que se identificaron, dan una medida de lo vulnerable que es el talud, a posibles deslizamientos o desprendimientos de bloques.

**Interpretación del perfil de tomografía eléctrica centro:**

Este corte (**Figura 8**) se encuentra representado en la parte central del perfil, entre los 20 y 70 m por resistividades del orden de los 50 a 60  $\Omega m$ , estos se asocian



**Figura 7.** Tomografías eléctricas perfil Oeste de las dos configuraciones ejecutadas (Elaboración de los autores).



**Figura 8.** Tomografías eléctricas del perfil centro de las dos configuraciones ejecutadas. (Elaboración de los autores)



a rocas arenolimosas de consistencia firme. La zona anómala de menor resistividad, que se encuentra alrededor de los 70 m del perfil está asociada a la zona 6 (Figura 9), la cual en la parte expuesta del talud que se observó en la ejecución de la adquisición, se haya meteorizada y con agrietamientos.

### Interpretación del Georradar

Los radargramas obtenidos evidencian una zonificación que puede correlacionarse con la información procedente de los pozos y la investigación geotécnica precedente. Se abordará la interpretación de uno de los perfiles, ya que son paralelos y presentan características similares entre sí. En la Figura 9, se muestran la identificación en el radargrama de las zonas Z-3 y Z6, zonas inestables de suelos y semi rocas a proteger de inmediato y de B1, bloque inestable.

También es posible identificar una primera de capa de espesor variable entre 4 y 8 m, que difiere en su comportamiento electromagnético de la capa infrayacente asociada a la formación Peñalver localizada en el talud.

### Modelo geológico

Para culminar con la interpretación del caso de estudio se confeccionó un modelo geológico (Figura 10) de uno de los perfiles, para el perfeccionamiento del modelo geotécnico propuesto del talud.

El modelo se confeccionó a partir de la infor-

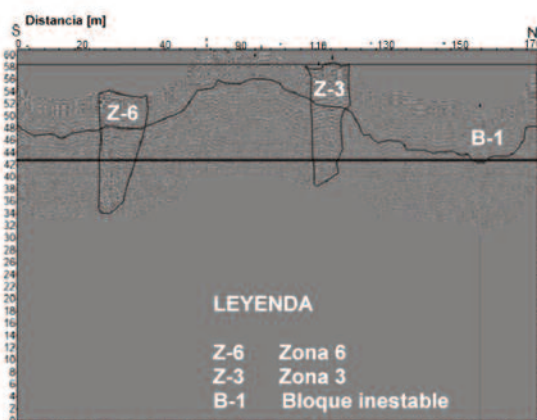


Figura 9. Perfil Oeste de Georradar (Elaboración de los autores).

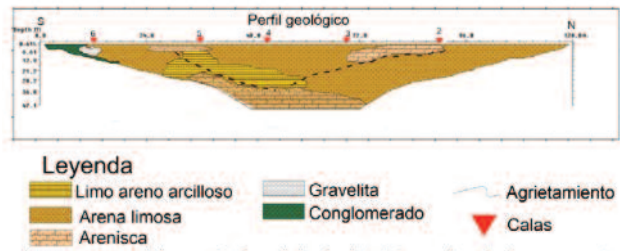


Figura 10. Modelo geológico del talud (Elaboración de los autores).

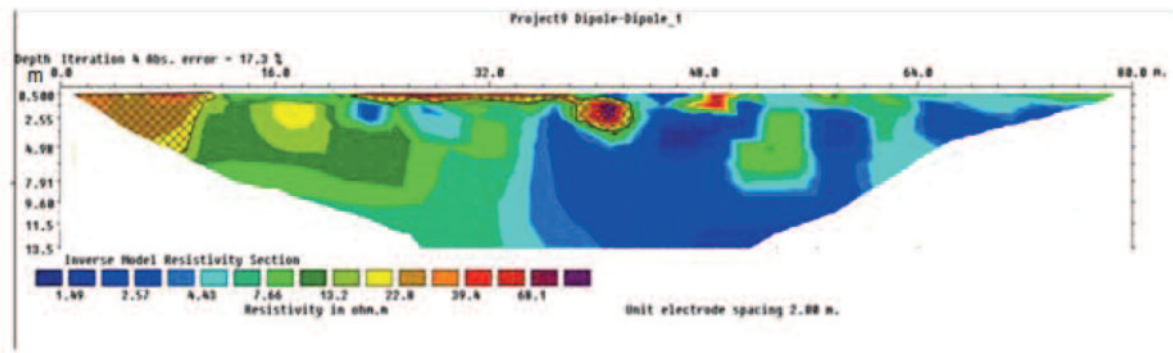
mación obtenida de los métodos geofísicos, tomografía eléctrica y georradar, además se utilizó la información recopilada de las calas para correlacionar los resultados de la interpretación de los métodos con la litología existente en el talud. En el mismo se puede apreciar la existencia de roca con poca dureza y procesos de agrietamiento que debilitan aún más dicho talud. La superficie de falla no se evidencia de forma clara, pero puede ser que se encuentre entre el contacto entre las dos formaciones Peñalver y Vía Blanca ubicado a los 20 m de profundidad y entre los 30 y 75 m de longitud del perfil.

### Caso de estudio 2

#### Tomografía eléctrica

Debido a alta humedad del subsuelo, el estudio de resistividad eléctrica, reportó información de baja calidad, pero se logró trabajar con la imagen relacionada con la configuración dipolo-dipolo que se muestra a continuación. En la Figura 11 se muestra la sección eléctrica obtenida en el talud sobre el que se encuentra el Castillo.

En los primeros 12 m se encuentra una capa de roca seca, porosa, de ambiente sedimentario con resistividades eléctricas entre 23 y 40  $\Omega\text{m}$  y 5 m de profundidad, marcada con rombos. A partir de los 5 m de profundidad, la resistividad eléctrica comienza a disminuir a valores entre los 7 y 14  $\Omega\text{m}$ , puede deberse a humedad en la roca. Entre los 22 y 44 m de longitud del perfil se encuentra una capa de alta resistividad eléctrica entre los 40 y 60  $\Omega\text{m}$  que se relaciona con una roca dura y seca. Por debajo de esta capa y en el resto del perfil hasta los 80 m, disminuyen considerablemente las resistividades eléctricas hasta el orden de los 2  $\Omega\text{m}$ , que



**Figura 11.** Perfil de Resistividades. Configuración dipolo-dipolo (Elaboración de los autores).

se interpreta como una roca muy húmeda y débil, hace que sea la parte más vulnerable del talud pues el agua constituye el factor pasivo debilitante del mismo. Se observan anomalías muy pequeñas, de muy baja resistividad eléctrica en contraste con zonas de mayor resistividad eléctrica, que pudieran ser microcavidades o zonas de muy alta porosidad rellenas de agua.

### Georradar

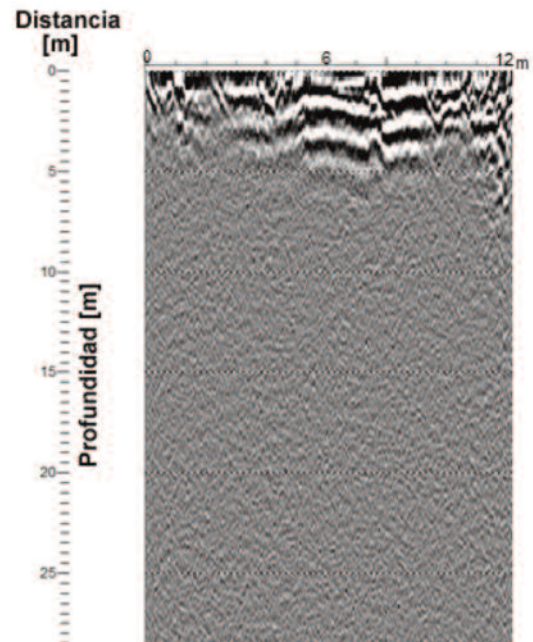
La utilización del método georradar se justifica por ser un equipo ligero, fácil de transportar y la puesta se realiza en un escarpe o ladera. Además, variando la frecuencia de la antena obtienen imágenes de diferentes profundidades y resultados de altísima resolución para las frecuencias muy altas y lo sensible que es para detectar capas que tienen un grado alto de humedad.

Por otra parte, en comparación con la tomografía eléctrica, las ventajas que posee es que el límite entre una capa y otra nunca va a ser muy claro, porque se trata de isóneas o valores convertidos en la tomografía. Este límite en el georradar es mucho más preciso cuando se trata de un análisis de la constante dieléctrica o de velocidades en el radargrama, ya que permite establecer de una forma más clara los límites entre las capas geológicas, a la vez que posibilita detectar dónde están esas capas que presentan esa alta conductividad eléctrica y se observa su reflejo o no, en el radargrama.

Por lo anterior, se decidió utilizar uno de los radargramas que coincide con los primeros metros del

perfil de tomografía eléctrica para complementar la interpretación de este trabajo.

La **Figura 12** muestra una sección de radargrama, que fue posible recuperar, consistente con los primeros 12 m de perfil trazado. Debido a la alta humedad de la zona los datos de georradar resultaron inutilizables por la alta atenuación de las ondas electromagnéticas y la pérdida de información. Esta imagen corrobora la capa de mayor resistividad eléctrica, de 5 m de espesor aproximado, como pudo observarse en la pseudosección eléctrica. A partir de los



**Figura 12.** Sección de radargrama (Elaboración de los autores).

5 m hasta los 30 m de profundidad, la roca es extremadamente húmeda y débil por lo que existe una atenuación de la señal que refleja en mayor medida el grado de conductividad, que presentan las rocas a partir de esa capa.

### Modelo geológico

A modo de resumen se confeccionó un modelo geológico (**Figura 13**) para esclarecer donde se encuentran las litologías pertenecientes a las formaciones Peñalver y Vía Blanca y dónde situar la superficie de falla del presente talud.

El modelo geológico está compuesto de rocas de origen sedimentario, las cuales se encuentran con un alto grado de humedad y debilitamiento en casi todo el corte. La superficie de falla se ubica sobre los 32 m de perfil aproximadamente. Esto corrobora lo apreciado en las visitas exploratorias realizadas al talud, en el cual se evidenció un desplazamiento de la masa rocosa que se encontraba afectando el muro perimetral del Castillo, por lo que se deben adoptar medidas inmediatas, para evitar el colapso o derrumbe de parte de la obra.

### Medidas a tener en cuenta

En base al análisis realizado se sugiere estabilizar ambos taludes implementando pernos de anclaje, ma-

llas de alambre galvanizado, concreto lanzado, zanjas de coronación y pie de talud. Se recomienda establecer medidas de prevención en cuanto a la ubicación de personal, debido al posible rodamiento y caída de bloques en el tramo central de dicho talud.

### CONCLUSIONES

- El monitoreo del talud con ambos métodos propuestos, Tomografía Eléctrica y Georradar permitió obtener datos de forma continua, corroborados por las calas existentes, sobre la estructura geológica y determinar zonas de agrietamientos, la existencia de un contacto entre dos litologías distintas y la superficie de falla de los taludes en la ZED Mariel, Zona A5 y en el Castillo de Santo Domingo de Atarés, Cuba.
- El método más efectivo fue la Tomografía Eléctrica ya que con este se pudo determinar las superficies de deslizamiento de los taludes estudiados y establecer una relación con la litología presente en ambos casos de estudio, lo cual corrobora su exitoso empleo en el país e internacionalmente.
- El método de Georradar presentó fallas en uno de los casos de estudio por la elevada



**Figura 13.** Modelo geológico del talud del Castillo de Santo Domingo de Atarés (Elaboración de los autores).

humedad, lo que provocó un aumento de la conductividad eléctrica en el área y como consecuencia la atenuación de gran parte de la señal.

● Los modelos geológicos establecidos para los taludes en la ZED Mariel, Zona A5 y en el Castillo de Santo Domingo de Atarés, son de gran utilidad al lograr aportar elementos (superficie de deslizamiento, grietas, humedad, etc.) que permiten perfeccionar el modelo geotécnica de partida.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Arias, D.E., O.E. Ramírez y F.H. Patiño**, 2012, Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. Boletín de ciencias de la tierra. 2012, 31, 39-50.

**Benítez, F.A.F.**, 2007, EL método de ground penetration radar (gpr) en el reconocimiento del subsuelo.

**Bièvre, G., D. Jongmans, T. Winiarski y V. Zumbo**, 2012, Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trieves area, French Alps). Hydrol. Process.

**González Fonseca, W.**, 2018, Evaluación geotécnica del talud. Obra: Talud RIMCO. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas ENIA.

**Guzmán, L.X.P.**, 2019, Modelación y caracterización física 3D, mediante prospección geofísica del deslizamiento de Triguales Altos,

Cuenca-Ecuador. Tesis en opción al grado de (inédita), Universidad de Cuenca,

**Hernández Sotolongo, C.Y.**, 2019, Tarea técnica para los Trabajos de Geofísica en el Castillo de Atarés. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas ENIA, 18 de junio 2019.

**Ortiz, D.G., T.M. Crespo, S.M. Velázquez, F.J. Lillo Y C.D. Ignacio**, 2007, Geoenvironmental characterization of mine ponds by means of electrical resistivity tomography. Geogaceta 2007.

**Pazzi, V., Stefanomorelli Y Riccardofanti**, 2019, A Review of the Advantages and Limitations of Geophysical Investigations in Landslide Studies. International Journal of Geophysics. 2019, Volume 2019, 27.

**Tabares, P.D.L.T.**, 2015, Procedimiento para la evaluación de la estabilidad de taludes. Casos de estudio: Carreteras de montaña de la Sierra del Rosario, Cuba Occidental. Tesis en opción al grado de (inédita), Universidad de Pinar Del Río «Hnos. Saíz Montes de Oca» 2015.

Fecha de recepción: 21 de octubre de 2020

Fecha de arbitraje: 23 de octubre de 2020

Fecha de aprobación: 28 de octubre de 2020

