

Capítulo 7



Una descarga eléctrica te puede revivir, creemos que también te puede encontrar. Geofísica aplicada

Uriel Gutiérrez Mendiola, Adán González Nisino y Ciclos GIP

Resumen

La aplicación geofísica ha facilitado el entendimiento del entorno por debajo de la superficie, lo cual representa una valiosa posibilidad para la localización de víctimas de desaparición inhumadas clandestinamente.

Con esta premisa como marco, en el Polígono 1 de experimentación forense — de la investigación multidisciplinaria coordinada por la Comisión de Búsqueda de Personas del Estado de Jalisco —, en fosas controladas donde se colocaron cuerpos de cerdos domésticos, se efectuó la técnica de prospección eléctrica, en su variante de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

A través del método se definió la existencia de una variación en los rangos resistivos, previos y posteriores a la deposición de los porcinos y su evolución en el tiempo.

Se concluyó que la técnica utilizada sí establece cambios y/o alteraciones en el manejo del subsuelo por la construcción de las fosas, permitiendo establecer y/o descartar sectores que fueron vulnerados por este tipo de prácticas clandestinas a partir de anomalías geoeléctrico-resistivas cuya unidad de medida es el ohm por metro ($\Omega \cdot m$).

En el área de estudio se presentó un incremento en la resistividad posiblemente asociada a una compactación desigual en el relleno de las fosas. El aumento fue más evidente en la medición a corto plazo (10 días) que a largo plazo (ocho meses después); tal comportamiento es atribuible a que, con el tiempo, el subsuelo recupera su homogeneidad y las variaciones comienzan a ser mínimas.

Palabras clave: prospección eléctrica, tomografía de resistividad eléctrica, anomalía geoeléctrico-resistiva, inhumación, fosas clandestinas, $\text{ohm}\cdot\text{m}$.

I. Prospección eléctrica-tomografía de resistividad eléctrica

La prospección eléctrica ha permitido, de manera indirecta, escudriñar el subsuelo terrestre (Avilés et al., 2020; Molina, 2014; Sagripanti et al., 2013; Sagripanti et al., 2017; Jakubovskii et al., 1980) con la finalidad de establecer el comportamiento litoestratigráfico y sus alteraciones y/o anomalías a poca profundidad (decenas de metros), así como a profundidades considerables (varios cientos de metros), de manera horizontal y vertical, a partir de la medición de resistividad eléctrica: el opuesto de la propiedad de conductividad.

La conductividad eléctrica de cualquier medio es una combinación de dos parámetros distintos: la conductibilidad iónica — donde los flujos actuales son la vía del movimiento del ion libre en un estado fluido — y la conductibilidad electrónica — en la que los flujos actúan por el intercambio del electrón en un estado sólido —. Excepto en la presencia de grandes porcentajes de minerales conductivos vinculados, como los depósitos del sulfuro macizos, la conducción iónica es dominante.

La litología (es decir, la roca) controla la conductividad en virtud de la permeabilidad (no simplemente la porosidad). Una excepción parcial es la presencia de minerales de arcilla saturados, donde la conducción iónica es importante. Esto es particularmente importante en la exploración de los recursos geotérmicos ya que, en la práctica, el objetivo es el (conductivo) de la alteración arcillosa.

Dado que existe cierta permeabilidad, la conductividad del fluido en los poros controla la resistividad volumétrica del medio. En el caso ideal la relación es simple, como está descrito en la Ley de Archie (Figura 1).

Figura 1. Fórmula en Ley de Archie

$$\rho = \alpha \phi - m \rho_w \quad \Omega m$$

Nota. ρ es la resistividad volumétrica, ϕ la porosidad, ρ_w la resistividad del fluido en los poros y “ α ” y “ m ” son constantes relacionadas a la composición de la roca.

En los sitios en los que la litología es simple, se esperaría detectar el contraste de resistividad debido al límite no saturado/saturado en el nivel freático, a los cambios grandes en la permeabilidad, o a la conductividad del fluido y el volumen de arcilla. Por consiguiente, una interpretación útil sólo es posible si se dispone de medios independientes de evaluar la importancia relativa de cada uno de estos factores.

II. El proceso

Se realizaron tres levantamientos de TRE distribuidos en dos campañas materializadas en el Polígono 1, ubicado en el municipio de Tonalá, Jalisco — en donde se distribuyeron 16 fosas (cuatro filas y cuatro columnas) en las cuales se sepultaron porcinos con diferentes tratamientos y profundidades —.

La primera campaña se desarrolló el 9 de junio del 2023; 10 días después de la inhumación de los ejemplares.

Se efectuaron seis tendidos de TRE con arreglo dipolo-dipolo de 28.2 metros de longitud, con 48 electrodos 0.6 metros. Dos tendidos se realizaron en zona sin fosas para establecer el comportamiento del subsuelo sin alteraciones¹, hasta una profundidad de cinco metros. Los

1 Es decir, el propósito de este levantamiento fue obtener parámetros de “control”.

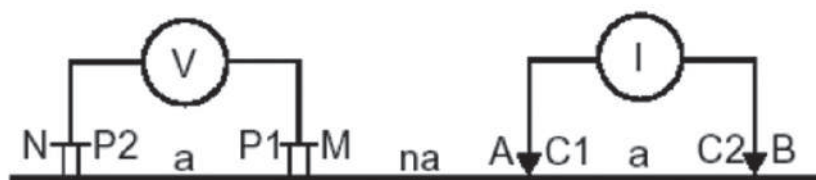
otros cuatro tendidos TRE (con las mismas características de arreglo en campo) se hicieron sobre las cuatro líneas de fosas, en orientación sur-norte.

Ocho meses después, el 13 de febrero de 2024, se llevó a cabo una segunda campaña. En ésta se realizaron cuatro tendidos TRE sobre las líneas de fosas, pero perpendiculares al primer levantamiento. Esto, con la finalidad de compactar la separación de electrodos a una equidistancia de 0.25 metros y así tener una mayor resolución en el comportamiento resistivo del subsuelo, obteniendo información a detalle hasta una profundidad de dos metros.

Para la tomografía eléctrica se aplicó el arreglo dipolo-dipolo (Figura 2) toda vez que entrega información 2D del terreno y es muy utilizada en la exploración hidrológica, geológica, estratigráfica y mineralógica. Y ahora, también, como herramienta de ayuda en las ciencias forenses.

Además el arreglo presenta una alta resolución para los contrastes laterales de resistividad, tiene una resolución mayor en niveles cercanos a la superficie y muestra un mayor número de mediciones, por lo tanto, es pertinente para encontrar estructuras verticales (como cavidades) u horizontales (como diques o capas sedimentarias).

Figura 2. Arreglo dipolo-dipolo



Fuente: Iakubovskii & Liajov (1980).

Nota. I= Inyección y medición de corriente eléctrica, V = Medición de la diferencia de potencial, A y B= electrodos de corriente, M y N=electrodos de potencial.

Una vez que se inyecta la corriente en el subsuelo, se genera un casquete semiesférico de radio, igual a la separación de los electrodos con el dispositivo. Con la corriente aplicada y el diferencial de potencial se calcula la resistividad aparente, que es igual a la diferencia de potencial medido entre la corriente inyectada multiplicando el residuo por K (coeficiente geométrico del dispositivo), la cual se obtiene dependiendo del arreglo utilizado, quedando de la siguiente manera:

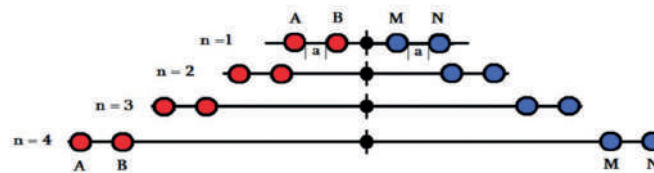
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K$$

Para el arreglo dipolo-dipolo el factor geométrico K se despeja a partir de la siguiente fórmula:

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a$$

Es de resaltar que, la sección 2D del subsuelo, se obtiene a partir de la adquisición de mediciones de resistividad, realizadas con un cuadripolo de electrodos. En una geometría determinada, posteriormente se aplica un algoritmo de inversión, con el programa RES2DINV ver. 4.02 (GEOTOMO SOFTWARE, 2013), para obtener una imagen eléctrica (un modelo de resistividad verdadera). Una desventaja de este arreglo es la pérdida de señal a valores grandes del factor “n”.

Figura 3. Esquema simplificado de una tomografía eléctrica con arreglo dipolo-dipolo



Fuente: Geotomo Software (2013).

El equipo utilizado es marca Iris Instruments, Prosys II, v.3.14, modelo SYSCAL PRO, fabricado en Francia (Figura 4). Las especificaciones del transmisor son las siguientes:

- Rango de inyección automática.
- Intensidad de corriente hasta 2.5 A.
- Voltaje de hasta 1000 V (1500 V con un convertidor externo DC/DC).
- Hasta 250 W (500 W con un convertidor externo DC/DC).
- Duración pulsos: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, u 8 s.

Figura 4. Equipo de resistividad utilizado



Fuente: elaboración propia.

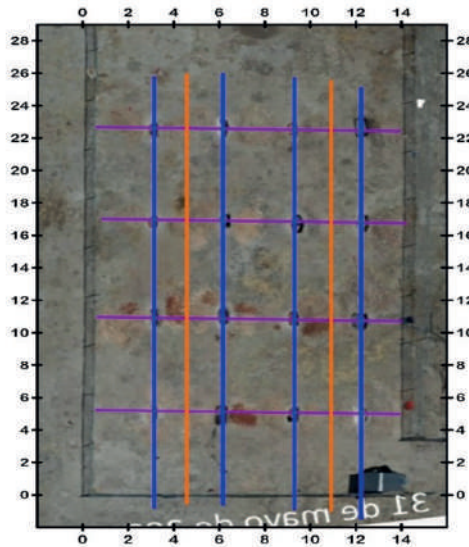
III. Interpretación

Los resultados adquiridos, posterior a su procesamiento e inversión, permitieron generar una imagen en dos dimensiones de la configuración resistiva del terreno, la cual está directamente relacionada con las propiedades de cohesión y saturación de los materiales del Polígono 1.

Asimismo, al correlacionar las líneas realizadas en cada una de las etapas (Figura 5) se construyó un modelo en tres dimensiones.

Para la interpretación se asignó una escala de colores que permite observar de una mejor manera los sitios en donde se obtuvieron valores de mayor o menor orden de acuerdo con los rangos adquiridos y respaldado con la configuración geológica de la zona, que establece la presencia de materiales pumítico-arenosos (jal) y sedimentos limo-arcillosos.

Figura 5. Distribución de los tendidos de tomografía eléctrica realizados en el Polígono 1



Fuente: elaboración propia.

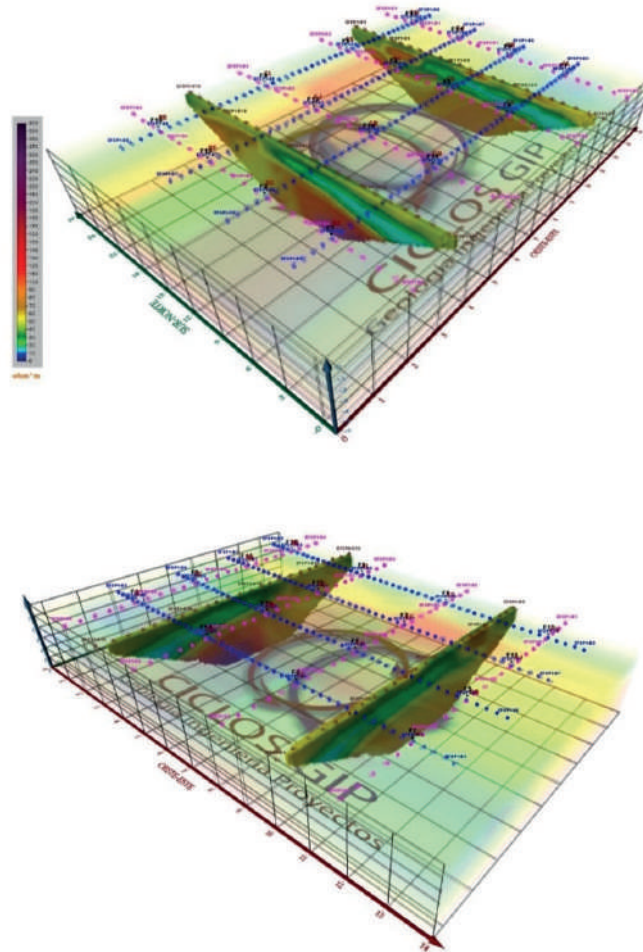
Nota. En color azul el primer levantamiento post construcción de fosas (10 días después). En color púrpura el segundo levantamiento post construcción (8 meses después).

Como anteriormente se describió, en el primer levantamiento se realizaron dos líneas TRE de control sobre terreno natural (sin haber sido afectado por la construcción de las fosas) obteniendo información hasta cinco metros por debajo del suelo. En una profundidad de 1-1.5 metros, aproximadamente, se precisó un comportamiento resistivo homogéneo con rangos del orden de los 30-60 $\Omega \cdot m$ (coloración verde-amarilla). En este sector es en el que quedaron instaladas las 16 fosas: ocho con una profundidad de 0.75 metros y ocho más con 1.25 metros profundidad.

Hacia los sectores centro y sur se observó el decaimiento en los rangos resistivos, promediando valores menores a los 30 $\Omega \cdot m$ (impresos en color azul). Inferior a esta capa bajo resistiva, hacia el sector sur y por debajo de la capa superficial en el sector norte, se identificó el incremento progresivo en los rangos geoelectrico resistivos, promediando principalmente valores por encima de los 60 $\Omega \cdot m$ (coloración amarilla-café-roja).

Así, quedaron establecidos los valores que se tomaron para dimensionar el comportamiento inicial del Polígono 1. A partir de éstos, se buscaron anomalías bajo y/o alto resistivas; en otras palabras, variaciones en los valores de resistividad asociadas a la presencia de las fosas clandestinas (Avilés et al., 2020; Molina, 2014; Quiroz, 2020).

Figura 6. Distribución espacial y comportamiento de las líneas de control con orientación sur-norte previo a la construcción de las fosas



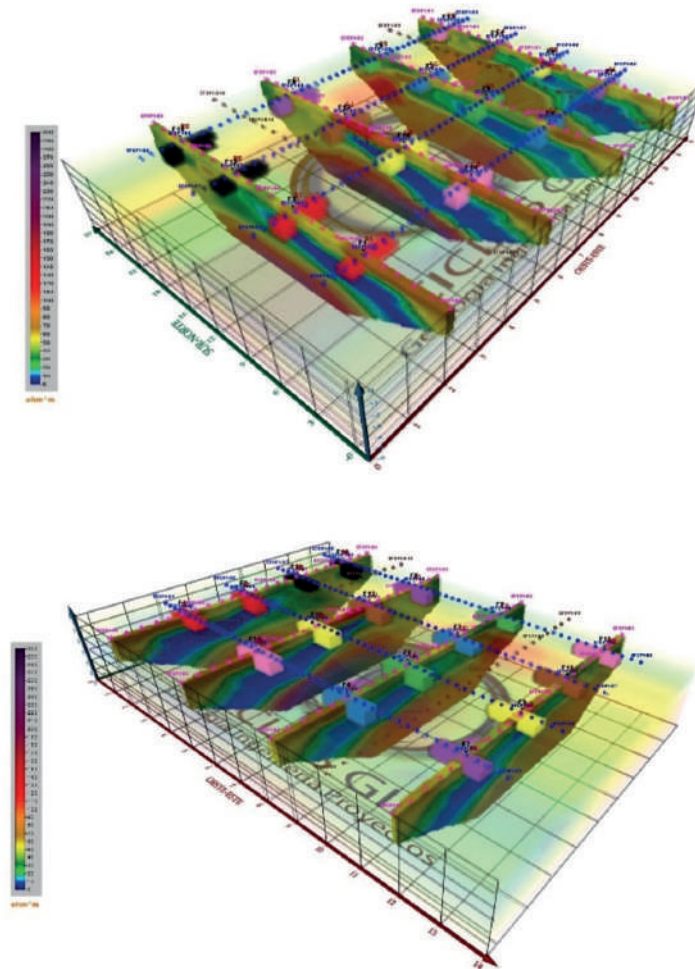
Fuente: elaboración propia.

Nota. La escala horizontal fue exagerada 3 a 1 para una mejor visualización de los tendidos TRE.

En el levantamiento TRE representativo del subsuelo ya afectado por la construcción de fosas e inhumación de porcinos, por debajo de los 1-1.5 metros de profundidad se reconoció un comportamiento geoeléctrico-resistivo similar al identificado en los tendidos de control previamente descritos: con el sector centro-sur con rangos resistivos de bajo orden (materiales conductivos en tonalidades azules), y por debajo de esta capa y hacia el norte, se continuó imprimiendo el incremento en los rangos resistivos con coloración amarilla, café, roja y morada.

Esta correlación resistiva, entre el levantamiento previo y el posterior a la excavación de las fosas permitió definir que el terreno virgen (sin manipular) del Polígono 1 no ha recibido afectación por lixiviados o cualquier otro residuo producto de la descomposición de los porcinos.

Figura 7. Distribución espacial y comportamiento de los tendidos TRE con orientación sur-norte tras 10 días de las inhumaciones (10 de junio de 2023)



Nota. En prismas se muestran las ubicaciones de las fosas por código de colores: rojo, sin cuerpo; negro, reducción esquelética; rosa, cuerpo quemado; amarillo, cuerpo dentro de bolsa; morado, cuerpo con cal; verde, cuerpo seccionado; azul, cuerpo completo y café, cuerpo con cobija.

En comparación con el levantamiento en el sector superficial, hasta los 1-1.5 metros de profundidad se apreció un ligero incremento en los rangos resistivos adquiridos, previo, alcanzando valores por encima de los $60 \Omega \cdot m$ (en tonalidades amarillas a rojas). Este crecimiento se adjudicó a una mayor porosidad en los materiales arenosos, producto de la remoción, inhumación y relleno de las fosas con el mismo material, pero con otro nivel de compactación; es decir, al generarse más huecos por material suelto, la corriente eléctrica inyectada al subsuelo sufre mayor resistencia a su paso debido a que ésta no se transmite por el aire.

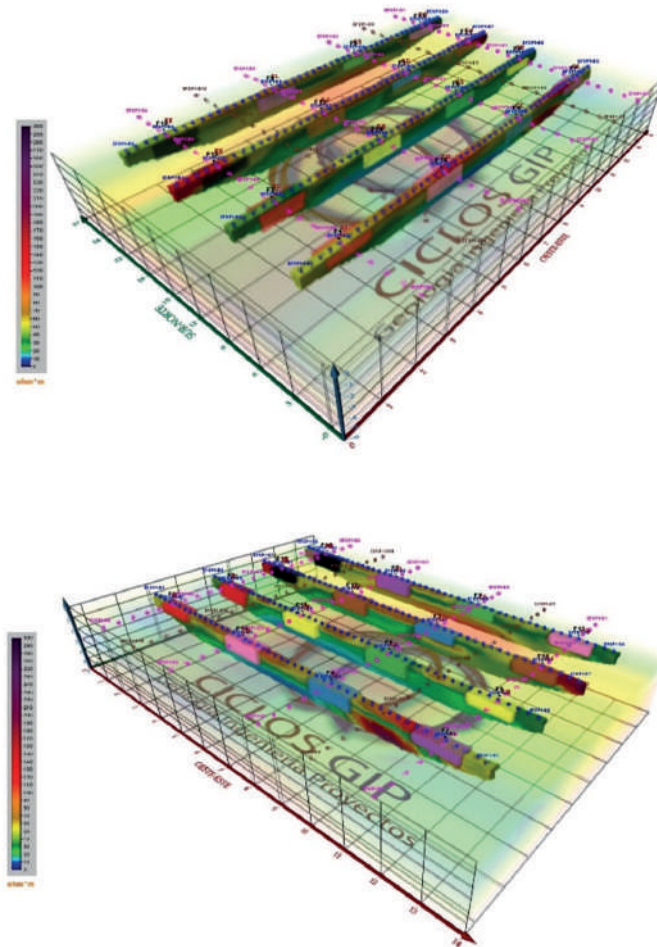
Finalmente, con el levantamiento realizado el día 13 de febrero del 2024², se identificó en todo el sector superficial un ligero decremento en los rangos geoeléctrico-resistivos, promediando valores por encima de los $30 \Omega \cdot m$ (coloraciones verdes a moradas).

Este ligero decremento se explica por el continuo tránsito peatonal que se tuvo en el Polígono 1, el cual funge como apisonador, compactando el material de relleno de las fosas.

2 Como se describió, el segundo levantamiento TRE se efectuó 8 meses después de la inhumación porcina y, en éste, se decidió cerrar el espaciamiento de los electrodos a 0.25 metros, sacrificando profundidad (2 metros de profundidad de investigación, específicamente), pero obteniendo mayor detalle del sector comprendido por las fosas construidas en un rango de 0.75-1.25 metros.



Figura 8. Distribución espacial y comportamiento de los tendidos TRE con orientación oeste-este a ocho meses de las inhumaciones (13 de febrero del 2024)



Nota. En prismas de colores se muestran las ubicaciones de las fosas por código de colores: rojo, sin cuerpo; negro, reducción esquelética; rosa, cuerpo quemado; amarillo, cuerpo dentro de bolsa; morado, cuerpo con cal; verde, cuerpo seccionado; azul, cuerpo completo y café, cuerpo con cobija.

V. Conclusiones

Los métodos geofísicos, como la prospección eléctrica, son técnicas indirectas que, a partir de parámetros físicos obtenidos desde superficie, buscan dar solución al problema requerido. El procesamiento e interpretación tiene la capacidad de modelarse (de forma unidimensional, bidimensional, tridimensional e incluso 4D) para explicar el comportamiento del subsuelo, como terreno natural o con afectaciones.

En la presente investigación se aplicó la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) como herramienta complementaria en la búsqueda y localización de sectores con presencia de fosas clandestinas. Específicamente, el método se utilizó en el espacio experimental denominado como Polígono 1, donde —controladamente— se inhumaron porcinos.

Con los rangos geoeléctrico resistivos adquiridos y agrupados, se pudieron establecer tres principales sectores: el primero, de corte superficial, se prolongó hasta una profundidad de 1-1.5 metros, considerándose como el de principal interés, debido a que ahí se ubicaron las 16 fosas para el experimento.

Con los tres levantamientos realizados (en dos campañas) se identificaron cambios en los rangos geoeléctricos adquiridos, obteniendo datos representativos de las condiciones previas a las inhumaciones, posteriores a las mismas (diez días después de la deposición de los cerdos) y ocho meses después de las sepulturas. Así, se logró un modelo 4D del Polígono 1³.

La comparativa entre los primeros dos levantamientos establece un incremento en los rangos resistivos adquiridos en el sector 1. Esto se adjudicó, principalmente, a la remoción de material arenosos (presente en la zona de estudio) y a la mala compactación del suelo, una vez que fueron depositados los porcinos y rellenas las fosas.

En el tercer levantamiento se presentó una ligera disminución en los rangos resistivos adquiridos, en comparación con el segundo. Lo anterior se vinculó al constante paso peatonal que propició la investigación multidisciplinaria, ayudando a la compactación, evidenciada por un ligero hundimiento en superficie.

Este comportamiento permite definir un mayor contraste en los rangos resistivos adquiridos a poco tiempo de haber sido realizadas las excavaciones, sobre todo si éstas se

3

Para lo cual se utilizó Golden software (2019). “Voxler” v. 4.6.913. 3D well data and modeling software. USA.



realizan en materiales porosos, como arenas, y no se efectúa una compactación similar al terreno proximal no vulnerado.

Otro dato relevante evidenciado fue el comportamiento de la resistividad, en el transcurso del tiempo. Este estudio permitió definir un regreso al comportamiento original (previo a las inhumaciones) del subsuelo, lo cual sugiere que el terreno busca su homogeneidad, o bien, que los cambios en los valores resistivos ya no son tan evidentes como en una medición relativamente cercana a la fecha de excavación.

Esta premisa de homogenización del subsuelo es coincidente con la investigación realizada por Berezowsky et al. (2013): en el seguimiento prolongado a una inhumación, entre los meses 58 y 69, se encontraron comportamientos resistivos similares a los originales; sin embargo, a los 78, una anomalía identificada en un inicio se redujo drásticamente en tamaño.

En casos no simulados, la medición de terreno previo a la construcción de una fosa clandestina es prácticamente imposible. Sin embargo, se puede solventar haciendo levantamientos de control sobre sectores cercanos libres de alguna perturbación.

La aplicación geofísica no es definitiva ni definitiva en la búsqueda e identificación de fosas clandestinas, pero, en conjunto con otras disciplinas, u otros métodos geofísicos (no solo la TRE), sí permiten determinar perturbaciones y/o anomalías en el subsuelo que represente la existencia de una fosa y/o un cuerpo ajeno al terreno.



Referencias

- AVILÉS, L., CAÑAR, M., REYES, M. & MULLO, C. (2020). *Geofísica aplicada a la búsqueda de restos óseos en el Ecuador*. Pro Sciences: Revista De Producción, Ciencias E Investigación, 4(34), 42–49. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol4iss34.2020pp42-49>
- BEREZOWSKY, V., MOFFAT, I., SECKINER, D., CREBERT, I., ELLI, J. & MALLETT, X. (2024). *The suitability of using domestic pigs (Sus spp.) as hua proxies in the geophysical detection of clandestine graves*. Journal of Forensic Sciences 69, 316-328 <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15419>
- GEOTOMO SOFTWARE (2013). “RES2DINV” v. 4.02. *Procesing software*. Malasya
- IAKUBOVSKII, V. & LIAJOV, L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Editorial Reverté.
- MOLINA, C. (2014). *Aportes de la geología forense en la investigación criminal en Colombia*. Geología Colombiana, 37, 171-178.
- O’ NEILL, D. (1975). *Improved linear filter coeficients for applications in apparent resistivity computations*. Bull. of the Australian Society of Exploration Geophysicist. V. 6.
- QUIROZ, D. (2020). *Métodos de exploración geofísica somera aplicados a la caracterización de inhumaciones: caso experimental y real*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM.
- SAGRIPANTI, G., VILLALBA, D., AGUILERA, D., & GIACCARDI, A. (2013). *Geología forense: Métodos aplicados en la búsqueda de desaparecidos en la región central de Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 70 (1), 150-160.
- SAGRIPANTI, G., VILLALBA, D., AGUILERA, D. & GIACCARDI, A. (2017). *Avances de la geología forense en Argentina: búsqueda con métodos no invasivos de personas víctimas de desaparición forzada*. Boletín de Geología, 39 (3), 55-69. <https://www.redalyc.org/journal/3496/349653053004/html/>



