



Capítulo 8



Reflejos de una búsqueda: el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas

Melina Gil Meza, Uriel Gutiérrez Mendiola y Dorian Quezada Esparza
Contribución arbitrada

Resumen

El análisis de las ondas electromagnéticas representa la posibilidad de aplicar la geofísica para la localización de víctimas de desaparición, que se encuentran ilegalmente inhumadas.

Con este objetivo, en el municipio de Tonalá, Jalisco, en el área denominada como Polígono 1 del proyecto de investigación forense interinstitucional, coordinado por la Dirección de Análisis y Contexto de la Comisión de Búsqueda de Personas Desaparecidas del Estado de Jalisco (COBUPEJ), se efectuó un levantamiento con un georradar o Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) en un espacio con fosas controladas realizadas a dos profundidades: 0.75 y 1.25 metros.

El análisis se aplicó 10 meses después del depósito de cuerpos (porcinos), sepultados con diferentes tratamientos (cubiertos con cal, bolsas plásticas negras, cobijas de algodón y poliéster; también se incluyeron cuerpos incinerados y en reducción esquelética).

A partir del estudio, de alcance exploratorio, se observó la existencia de tres estratos de degradación manifestados con el comportamiento electromagnético y la coincidencia de la ubicación de más del 80 % de los límites de las fosas con la existencia de reflejos.

Igualmente se aporta que, 56 % de las reflexiones, mostraron una sutil curvatura a manera de hipérbola. Dicha situación se asocia con la excavación para la realización de fosas, más que al proceso propio de descomposición.

Palabras clave: electromagnetismo, georradar, Radar de Penetración Terrestre (GPR), geofísica forense, inhumación, fosa clandestina.

I. Introducción

Las aplicaciones de la geofísica, ciencia natural que estudia la dinámica interna y externa del planeta Tierra con todos sus procesos y transformaciones (Molina, 2014, p.172), se han trasladado al campo de investigaciones de contextos violentos. Criminales.

Entre las posibilidades de esta disciplina se encuentra la detección y reconocimiento de objetos o estructuras que se encuentran por debajo de la superficie, a través del uso de dispositivos como el georradar ó Radar de Penetración Terrestre (GPR): una tecnología que emite pulsos de energía electromagnética y registra las señales reflejadas de forma diferenciada, según los objetos que detecte.

Esta herramienta, bajo la visión de la geofísica forense, no ha sido ajena a diversos procesos de búsqueda y localización de restos humanos que se encuentran inhumados, implementados en Europa y América Latina.

En el proyecto de experimentación forense¹ se precisó entender cómo se comporta la reflexión de ondas electromagnéticas ante la presencia de cuerpos —de porcinos— enterrados con la réplica de las características más comunes detectadas en víctimas de desaparición, localizadas de forma post mortem en el estado de Jalisco.

Además de comprender la actividad por la presencia *per se*² del contenido de las inhumaciones, se asumió como objetivo el análisis de la propagación electromagnética en un espacio que conjuga tierras a nivel con suelos limoarcillosos, predominancia de roca toba

1 Es decir, el proyecto de investigación interinstitucional que da pie a la presente publicación.

2 Por sí misma. En este caso, la locución se refiere a que, naturalmente, el comportamiento de las ondas se vería afectado, en primera instancia, por la remoción de la tierra y los cuerpos inhumados. Sin embargo, la intención es analizar no sólo esta situación evidente, sino su combinación con las características físicas del entorno.

y clima templado subhúmedo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, s.f.; Instituto de Información Estadística y Geográfica, 2021c; Instituto de Información Estadística y Geográfica, 2021d; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2023).

Es decir, la particularidad de esta investigación exploratoria es el acercamiento a condiciones más cercanas que las realizadas previamente en contextos internacionales. Esto, con la mira en potenciar el conocimiento del comportamiento de la naturaleza —aún de sus fenómenos complejamente perceptibles a simple vista, como es el electromagnetismo— en territorios del occidente de México donde exista la posibilidad de localizar y restituir a personas desaparecidas.

II. Los antecedentes

Electricidad y magnetismo conforman una vinculación indisoluble que se presenta y expresa de forma constante.

La electricidad tiene su origen en los átomos, las partes más pequeñas de la materia que son imposibles de descomponer químicamente. Se integran de partículas denominadas neutrones (sin carga), protones (carga positiva) y electrones (carga negativa). Cuando estos últimos se desplazan de un átomo a otro —ya sea de forma natural o inducida— producen corriente eléctrica. En ese movimiento se generan campos que pueden ser de atracción o repulsión.

Así, a la interacción entre las cargas eléctricas y las fuerzas de imantación se le denomina electromagnetismo.

La energía que conjugan se propaga a través del espacio en forma de oscilaciones, las cuales se mueven perpendiculares entre sí y hacia la dirección de la onda. Viajan a través del espectro electromagnético, transportando luz, ondas de radio, microondas, así como rayos X, ultravioleta y gamma.

La variación de las propiedades eléctricas resistividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética son las más relevantes y tienen un impacto directo en la medición de la emisión de ondas electromagnéticas y su reflejo (Annan, 2009, pp.6-8; Cassidy, 2009, pp. 43-55).



La resistividad es la capacidad con la que un material se opone al flujo de la corriente eléctrica, por lo que condensa las ondas electromagnéticas (su opuesto es la conductividad).

Entre los aislantes se encuentran los denominados *dieléctricos* que cuentan con el atributo de la permitividad: una constante que representa la interacción entre un campo eléctrico y un material no conductor (Olarte et al., 2010, p. 223). Para el uso del Radar de Penetración del Terreno (GPR, por sus siglas en inglés), utilizado en la presente investigación, resulta relevante dado que implica la velocidad con que las ondas penetran un terreno.

En lo que respecta a la permeabilidad magnética, que es un parámetro físico que mide la capacidad para conducir o transmitir un campo magnético, se considera como el factor que permite atenuar o acrecentar el comportamiento del reflejo que se registra con el método de GPR (Annan, 2009, pp. 6-8; Cassidy, 2009, pp. 43-55). La intención final con éste, es la identificación de cualquier anomalía en la reflexión, es decir, de una característica o patrón inusual que destaque del trazo homogéneo, y pueda indicar objetos, cavidades, estructuras, entre otros.

Ante la presencia de restos o cuerpos, se ha distinguido la expresión sutil de la actividad electromagnética en forma de una hipérbola³, de pequeñas dimensiones, pero que puede ser variable en función de la presencia de otros elementos (Áviles et al., 2020; Sagripanti et al., 2013; Rivera, 1994, párr. 5). La compactación que presenta el suelo también muestra formas susceptibles de cuantificarse (Rivera, 1994, párr. 5).

Molina (2016, p. 1-3, 11) distingue diferentes momentos de la aplicación geofísica para la búsqueda evidencia forense y fosas clandestinas; los más antiguos se remontan hasta la década de los setenta.

En esos intervalos se conocen diferentes ejemplos prácticos implementados en el mundo: en 1994, las autoridades británicas aplicaron el uso de una tecnología (privada) para, con la reflexión electromagnética, detectar cuerpos ocultos en un domicilio de Gloucester, en Reino Unido (Rivera, 1994, párr. 1-6). Asimismo, la herramienta ha sido utilizada para la búsqueda de víctimas de la Guerra Civil Española (Ferrer, 2020).

En Argentina, desde el año 2004, investigadores de las universidades nacionales de Río Cuarto y San Luis han trabajado en conjunto con autoridades públicas, organismos de derechos

3

Anomalía en forma de curva abierta que es simétrica respecto a dos ejes que se cruzan perpendicularmente entre sí.



humanos, el Equipo Argentino de Antropología Forense (EAAF) y familiares de personas desaparecidas para ubicar sitios de enterramientos clandestinos de víctimas de desaparición forzada (Sagripanti et al., 2017, párr. 10-11). La prospección se ha enfocado en profundidades menores a tres metros.

En una de las investigaciones desarrollada en Ecuador (Áviles et al., 2020), con el método geofísico georradar y una antena de 250 MHz⁴, se implementaron pruebas experimentales en una fosa de un metro de profundidad en suelos no homogéneos, donde se colocaron restos de un *Canis lupus familiaris* de 0.80 metros de largo, levantando análisis en tres temporalidades.

Según documentaron Avilés et al. (2020), la formación de las hipérbolas relacionadas a la descomposición fue en extremo sutil, con probabilidad de enmascarse en función de la existencia de objetos, como tuberías. No obstante, concluyó que la remoción de suelos y restos óseos se puede evidenciar con mayor facilidad en profundidades de 0.80 metros, hasta después de 38 semanas de la inhumación (Avilés et al., 2020, p. 47).

Uno de los estudios de métodos geofísicos más amplios se produjo en tierras colombianas (en las ciudades de Mosquera y Villavicencio), donde se simularon 12 fosas, a tres profundidades (0.50 metros, 0.80 metros y 1.20 metros). En las inhumaciones se colocaron tres cerdos con medio cuerpo cubierto por prendas, tres esqueletos humanos, tres huesos quemados y tres inhumaciones se dejaron vacías, como control⁵ (Molina, 2016, pp. 17-37). Para el uso del georradar se utilizaron antenas de frecuencias de 250 MHz y 500 MHz.

La investigación determinó una mayor complejidad de detección en los objetivos más alejados de la superficie, aunado a la identificación de la influencia de suelos arcillosos húmedos en la generación de pérdida de información (en contraste con las áreas secas, que proveyeron mejores datos). El registro de alteraciones en el terreno fue variado; las fosas vacías, esqueletos y cerdos mostraron mejores anomalías, a diferencia de los restos quemados y sus resultados mixtos. El porcino enterrado a medio metro fue el único que reflejó hipérbolas (Molina, 2016, pp. 39-100).

La factibilidad de utilizar cerdos domésticos como “sustitutos” de cuerpos humanos en la detección de fosas clandestinas, mediante métodos geofísicos, fue estudiada recientemente

4 MHz es la abreviatura de megahercios. Un megahercio es una unidad de medida de la frecuencia.

5 Se denomina “control” a aquellos sitios, sujetos, objetos que no reciben ningún tipo de impacto o tratamiento en una experimentación. Su consideración sirve para confrontar resultados respecto de los elementos que sí son intervenidos.

(Berezowski et al., 2024) Además de validar esta hipótesis, la investigación desarrollada en instalaciones australianas posibilitó el reconocimiento de que, las hipérbolas detectadas por el GPR muestran tanto el contenido de la tumba como las alteraciones del suelo asociadas a la excavación (Berezowski et al., 2024, p. 323).

En México, sostiene Quiroz, la exploración de técnicas de prospección geofísica en el campo forense es reciente, por lo que “las investigaciones de este tipo son escasas y poco estudiadas” (2020, p.7).

En este universo selecto, se identifica el trabajo pionero del antropólogo forense Talavera González quien, a inicios del siglo XXI, en los jardines de la Escuela Nacional de Antropología e Historia⁶, encabezó un estudio con fosas simuladas en las que se emplearon huesos humanos áridos y un cerdo “porque sus características bioquímicas y fisiológicas son parecidas a las de humanos”, (Talavera et al., 2000, p.13)⁷. Se colocaron los restos en seis cavidades a medio metro de profundidad, utilizando dos antenas, una de 300 MHz y otra de 900 MHz; se concluyó la pertinencia del radar como método de prospección con la capacidad añadida para distinguir tejidos blandos de restos esqueléticos (Talavera et al., 2000, pp. 13-15).

En la Ciudad de México, en la localidad de Milpa Alta, existe un antecedente más reciente, en el que se utilizaron porcinos en una inhumación experimental, para realizar exploración física somera, en investigación impulsada desde la Universidad Nacional Autónoma de México: en siete excavaciones, de hasta 1.5 metros de profundidad, se depositaron 6 cerdos domésticos. Simultáneamente se perfiló una fosa común de Morelia, Michoacán (Quiroz, 2020).

Entre los métodos aplicados, a lo largo de 15 meses, se hizo uso del GPR, logrando la delimitación del contorno de fosas (con la aparición de anomalías identificadas por líneas o cortes verticales en el subsuelo) y una eficiente resolución de reflejos producidos por las excavaciones (Quiroz, 2020, págs. 1, 102 y 105).

No obstante, para el uso del GPR — como uno de los diversos métodos existentes de Prospección Geofísica Somera —, Caccavari-Garza et al. (2020, pp. 3-4) advierten limitantes: un contraste insuficiente entre el objetivo y el suelo que rodea; que la respuesta en la propiedad física corresponda a una situación y no a un objeto; complicaciones técnicas y/o humanas; así

6 Ubicada en Tlalpan, Ciudad de México.

7 Talavera contaba con antecedentes de investigaciones previas, como una efectuada en la Universidad de Tennessee, en donde utilizaron cuerpos humanos y de cerdos.



como la presencia de “ruido”. En ese sentido, es recomendable medir más de una propiedad física y contar con “información sobre el contexto, el clima y la geología del lugar, de manera que pueda llevarse a cabo una mejor interpretación de las mediciones realizadas” (Caccavari-Garza et al., 2020, p. 4).

III. Trabajando el electromagnetismo

10 meses después de la inhumación realizada en el Polígono 1⁸ — ubicado en el municipio de Tonalá, Jalisco, sobre suelos Vertisoles, es decir, con alto contenido de arcilla—, se efectuó una medición geofísica de las 16 fosas distribuidas en el área. 14 de ellas, conteniendo el cuerpo de porcinos con características diferenciadas mientras que, las dos restantes, presentándose vacías, para control (Tabla 1).

Para el estudio del electromagnetismo se utilizó un Radar de Penetración del Terreno portátil (GPR, por sus siglas en inglés) (modelo *US Radar*) con una frecuencia de antena de 450 MHz, que permite una profundidad de 2.90 metros⁹. También se hizo uso de un el cable *Ethernet* ó RJ45 y una fuente de energía, manipulada por una persona operadora.

El GPR mide la frecuencia de los impulsos electromagnéticos desde la superficie al subsuelo y la respuesta de esos pulsos es detectada por una antena receptora, en caso de que exista una alteración (provocada por la diferencia entre las propiedades dieléctricas de los materiales), se obtiene información sobre la intensidad, tamaño y forma de la anomalía causada por la presencia de restos u objetos (Beres et al., 2001; Conyers, 2006; Ruffell & McKinley, 2008, en Molina, 2016, p. 11).

8 La fecha exacta de la medición con GPR fue el día 19 de abril de 2024. Los detalles de los polígonos de investigación se encuentran detallados en el capítulo de la obra denominado “Experimentación forense: la historia de un proyecto”.

9 Se menciona que la antena de 450 MHz profundiza a 2.9 metros. Sin embargo, esto no es una constante puesto que depende del tipo de suelo, en particular del valor de la constante dieléctrica. Así, vale la pena subrayar que el valor de 2.9 metros corresponde al tipo de suelo específico, en la fecha del sondeo.



La configuración de la antena fue la siguiente:

- Muestras por escaneo: 256.
- Promediando hardware: avg_8.
- Promediando software: 32.
- Compensación de deriva: habilitado.
- Intervalo del eje: mm_25.
- Periodo de tiempo: 51 ns.
- Tvg slope: 0.855 Db/ns.
- Tvg start: 12db.
- Desplazamiento de profundidad: #6.
- Posición de pulso 14.2.

El terreno fue limpiado de obstáculos en superficie y con los materiales descritos, en una dirección de oeste a este, se realizó una delimitación de nueve franjas ó transectos de 13.85 metros de largo (sobre los cuales se avanzó con el GPR): cuatro correspondieron a las líneas de fosas ubicadas a los 5.2, 11.3, 17.0 y 23.0 metros respecto del origen del barrido (ubicado hacia el sur) (Figura 1).

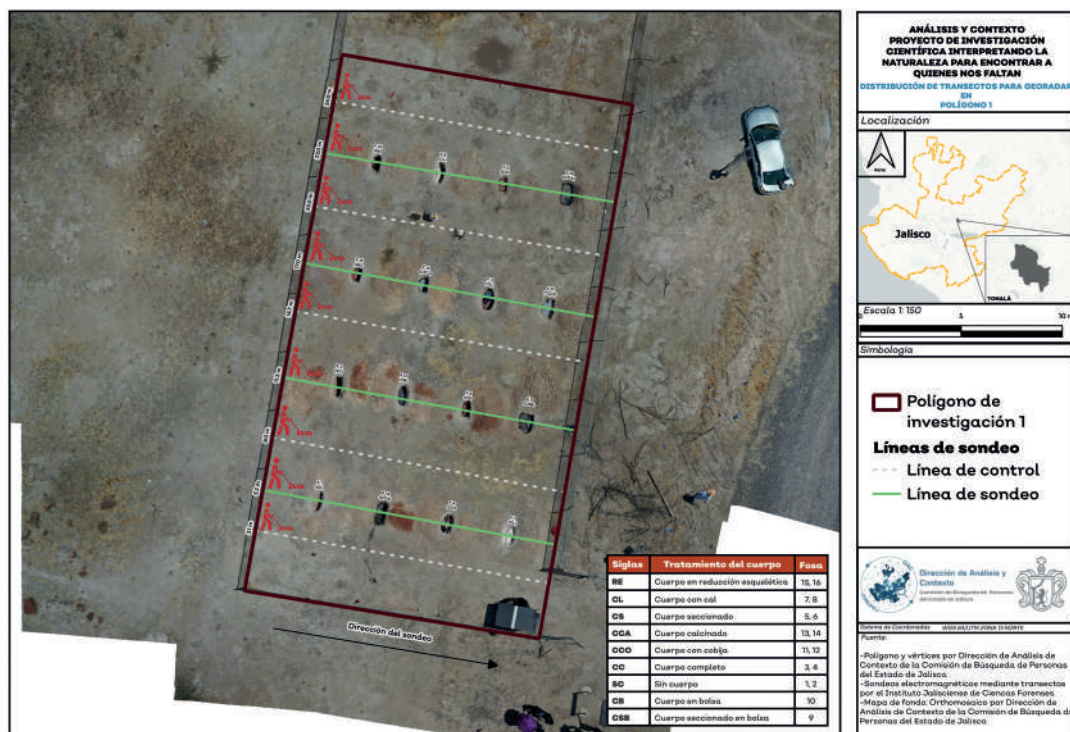
El resto del estudio se aplicó a un quinteto de franjas de control, localizadas a 3.1, 8.0, 14.7, 20.0 y 26.0 metros de distancia del punto de inicio.

Los transectos se definieron apoyados con cintas métricas fijadas con estacas, para tener un mayor control del sondeo.

Los resultados obtenidos se procesaron a través del software *US Radar Controller*, para obtener un radargrama por cada transecto: un registro gráfico en que se revela la forma de las ondulaciones.

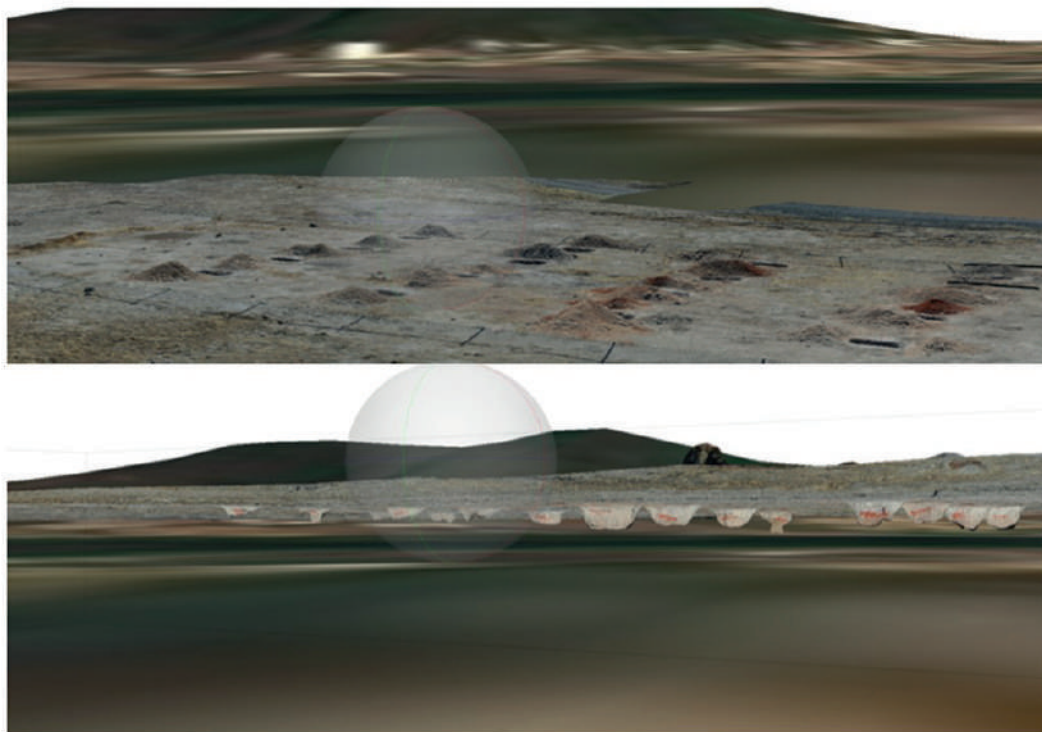
En total, se generaron nueve radargramas. A las imágenes de los transectos que se hicieron se les aumentó el brillo y contraste en un 40 %, de forma que se percibieran mejor las posibles anomalías.

Figura 1. Distribución de transectos para georradar



Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ.

Figura 2. Fotogrametría de superficie y profundidad de fosas



Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ. Las imágenes fueron tomadas con el dron Mavic 2.

IV. Los reflejos: información, resultados y hallazgos

Existen diversas técnicas de procesamiento que pueden ayudar a mejorar los resultados para tener una mejor interpretación. En ese sentido, y como parte de las limitaciones del método, es preciso manifestar que la información final no fue trabajada en el sentido de solventar la presencia de material heterogéneo en el subsuelo y conservar únicamente señales con sentido geológico (Quiroz, 2020, pp. 42-46).

No obstante, de manera exploratoria, el comportamiento electromagnético en las inhumaciones, y sus transectos de control, permitió la observación de tres niveles o estratos en los radargramas obtenidos (Figuras 3 -11):

- Estrato A, ubicado de los 0.00 a los 0.15 metros.
- Estrato B, de los 0.16 a los 0.96 metros.
- Estrato C, que abarca de los 0.97 a 2.90 metros.

Esta división se encontró de forma constante en los nueve transectos y es coincidente con la triada de tonalidades que presentan los suelos del Polígono 1.

El estrato A corresponde a la parte más superficial y, en consecuencia, representa el que ha sufrido mayor impacto por la remoción de tierra y actividad humana derivada de la propia investigación e, incluso, de labores previas realizadas en el sitio. Su condición (en el radargrama) se encuentra visiblemente expresada a través de la manifestación de una banda de color, que pierde definición al avanzar hacia los Estratos B y C, en donde se encuentran suelos limoarcillosos, mismos que complejizan el registro del comportamiento de las propiedades eléctricas.

Únicamente en el transecto ubicado a 8 metros del punto de origen, se aprecia una interrupción transversal de la definición de los tres estratos, justo a la mitad de la franja (Figura 8).

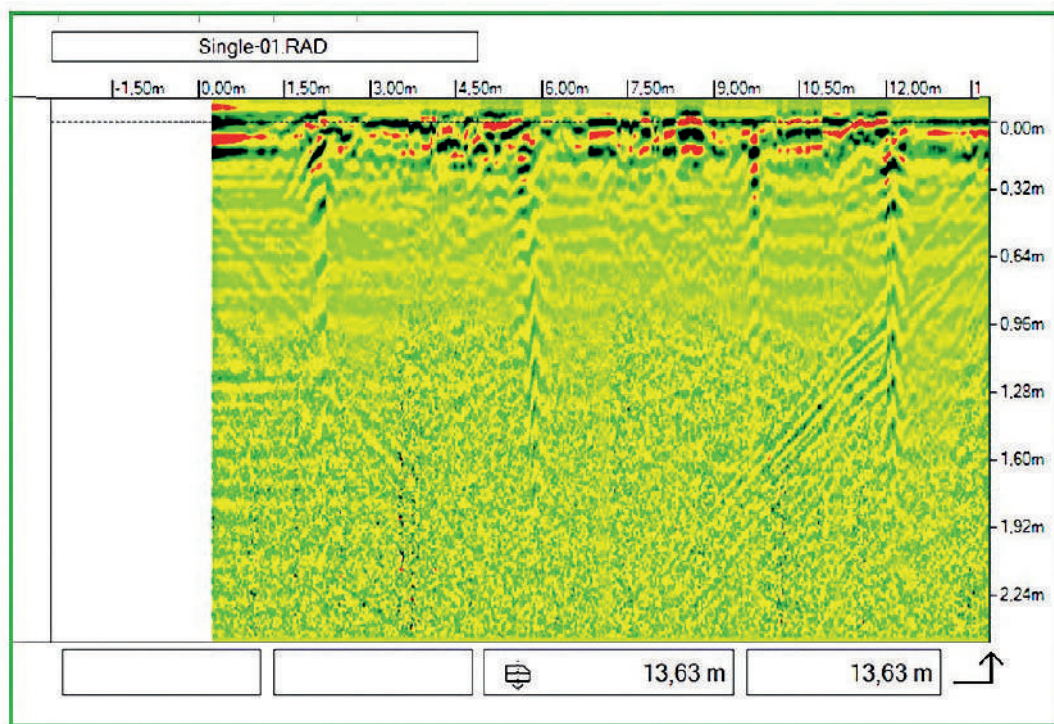
Para relacionar la ubicación de las inhumaciones y los reflejos mostrados en los radargramas, se confrontó la localización georreferenciada de las fosas y la aparición de las reflexiones (estimando su posición a partir de las distancias de los transectos).

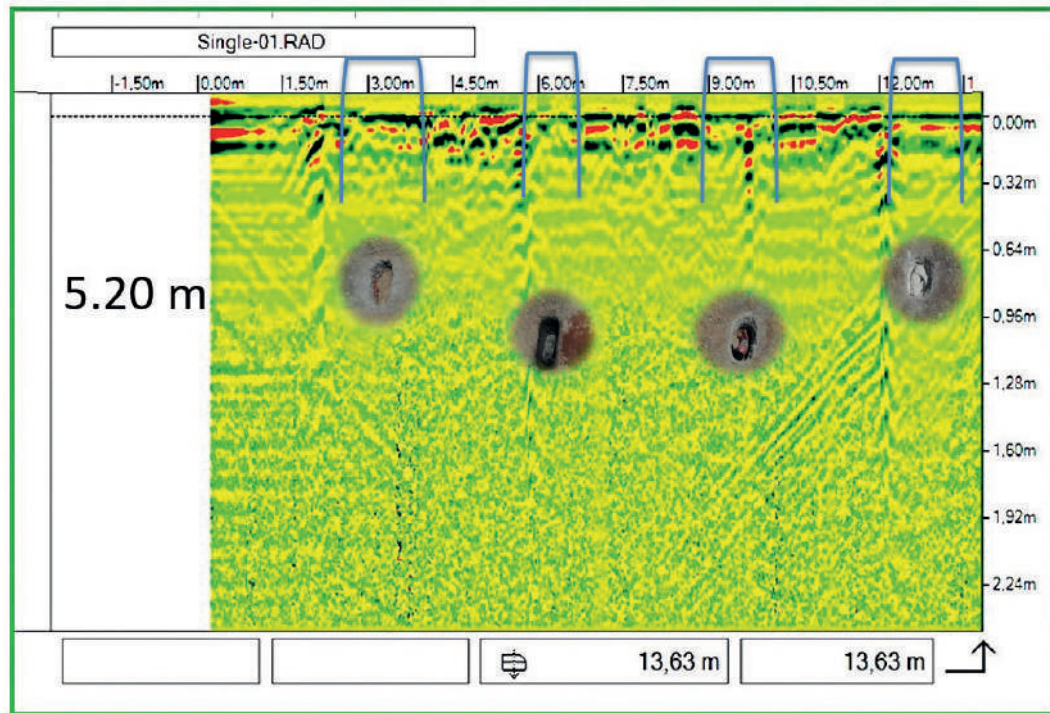
Cada radargrama con línea de fosas presentó sus propias especificidades:

- El gráfico correspondiente al transecto, ubicado a 5.20 metros del punto de origen del sondeo, muestra reflexiones de los 0.64 a los 1.60 metros de profundidad. También se aprecian cuatro continuidades de reflejos que se extienden en un sentido coincidente a los límites de la ubicación de las excavaciones (Figura 3). Esta franja contiene dos fosas a 0.75 metros (a los extremos) y dos más a 1.25 metros (al centro de la línea). La

primera cavidad (de este a oeste) se encuentra vacía, al ser de control (F1). La contiguas contienen un porcino calcinado (F14), un cuerpo completo (F4) y un ejemplar con cal (F7).

Figura 3. Radargrama de transecto ubicado a 5.20 metros del punto de origen (F1, F14, F4 y F7, de izquierda a derecha)



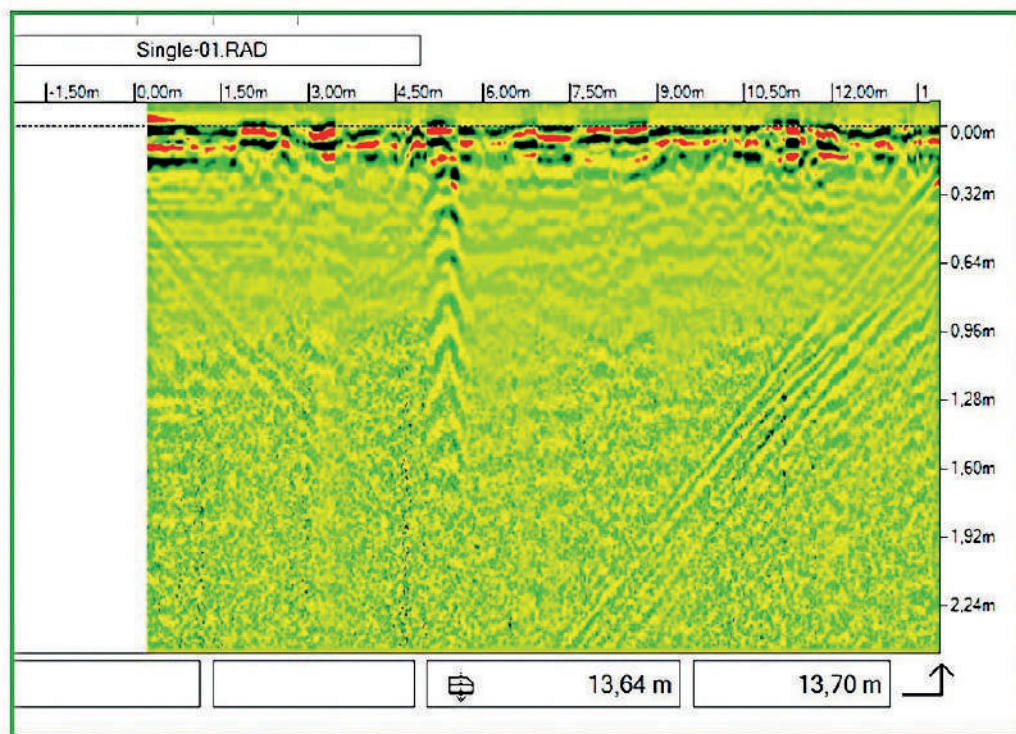


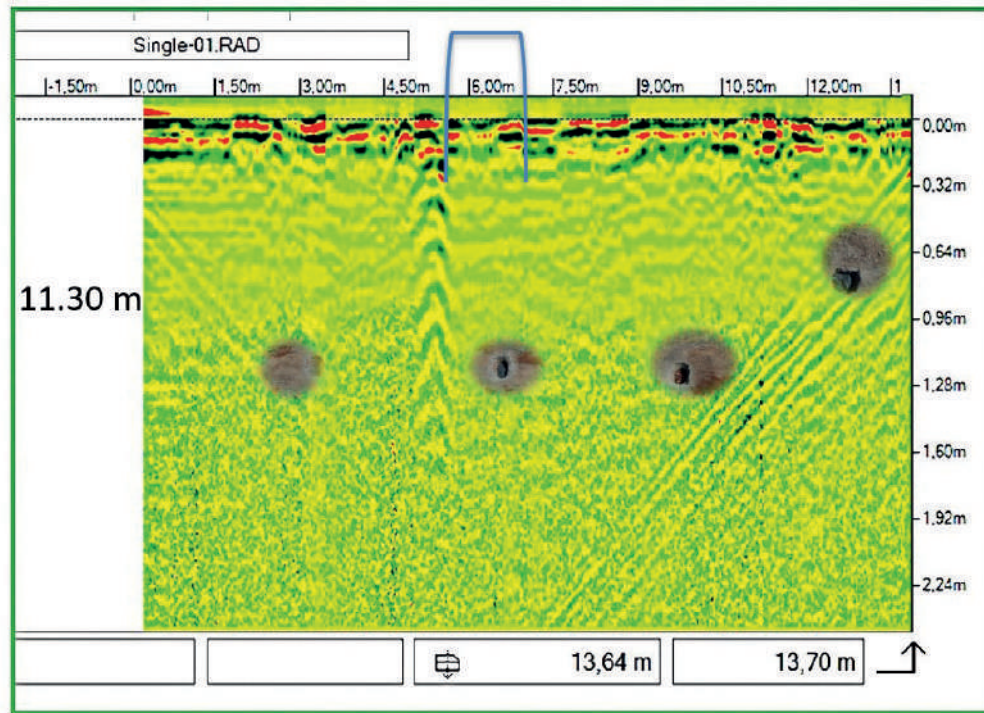
Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ y el Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

- El radargrama del transecto ubicado a 11.30 metros del punto de origen evidencia una reflexión más definida hacia la frontera de la segunda inhumación (donde se encuentra el porcino envuelto en una bolsa plástica, F10). El resto de los reflejos que coinciden con la dirección de las fosas se muestran más someros (Figura 4).

En esta franja también se encuentra una inhumación vacía (de control) (F2), un cuerpo seccionado (F6) y otro también contenido en un envoltorio plástico (F9). Las primeras tres excavaciones son a 1.25 metros, la última se ubica a 0.75 metros.

Figura 4. Radargrama de transecto ubicado a 11.30 metros del punto de origen (F2, F10, F6 y F9)



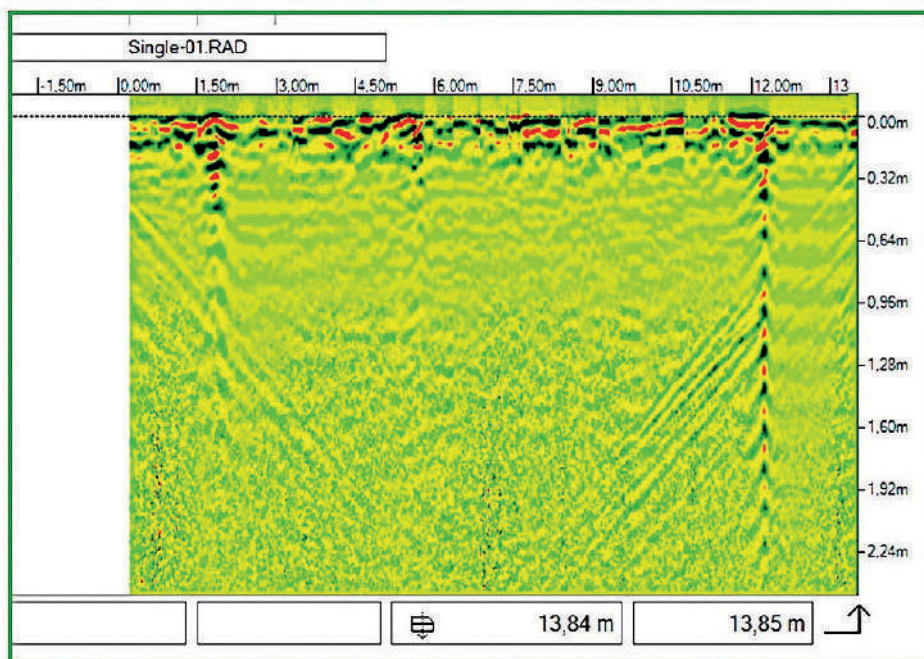


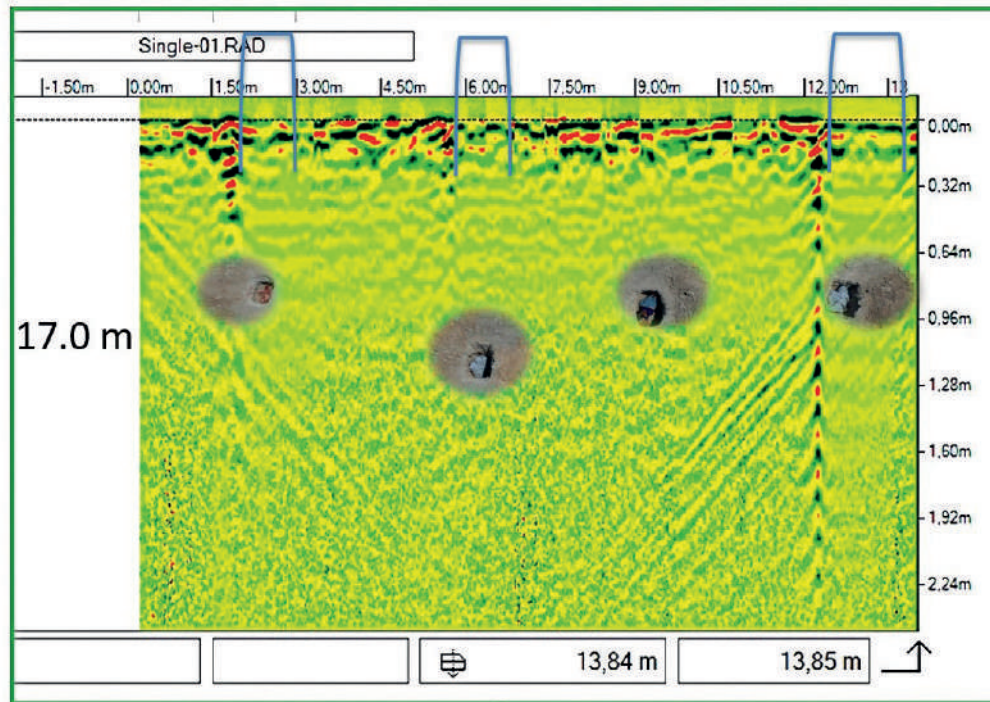
Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ y el Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

- El radargrama de la franja dispuesta a 17.00 metros del punto de origen exhibe reflejos continuos hacia los extremos, e incluso, se extienden más allá de la ubicación de los cuerpos (Figura 5).

El transecto implica, de oeste a este, las fosas en las que se depositaron un cerdo en reducción esquelética (F15), un cuerpo con cobija (F12), un porcino completo (F3) y uno más envuelto en una frazada (F11). Las excavaciones son superficiales, a 0.75 metros de profundidad, a excepción de la segunda inhumación, que se muestra a 1.25 metros.

Figura 5. Radargrama de transecto ubicado a 17.00 metros del punto de origen (F15, F12, F3 y F11)





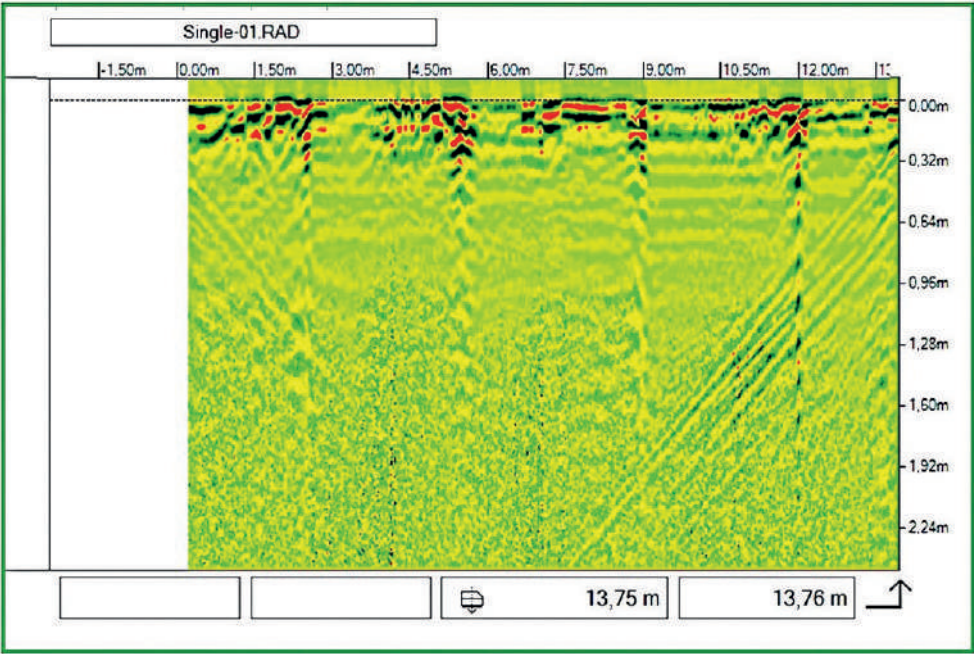
Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ y el Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

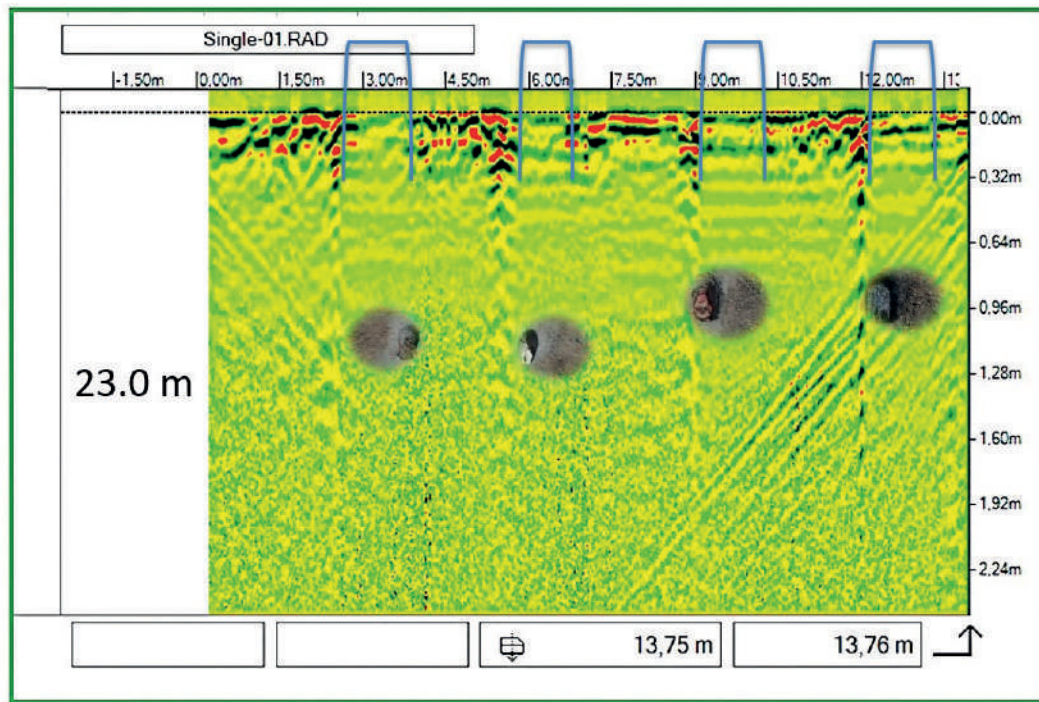
- En el gráfico de la franja asentada a 23.00 metros del punto de origen del sondeo se percibe un comportamiento seccionado de las reflexiones superficiales: dicha fragmentación se muestra de forma similar a la distribución de las excavaciones, sugiriendo una delimitación de los límites de las oquedades, captadas por el GPR (Figura 6).

En este transecto se ubica un cuerpo en reducción esquelética (F16), un cerdo con cal (F8), un porcino seccionado (F5) y otro más calcinado (F13) (los dos primeros sepultados a 1.25 metros; los dos restantes, a 0.75 metros).

Reflejos de una búsqueda:
el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas

Figura 6. Radargrama de transecto ubicado a 23.00 metros del punto de origen (F16, F8, F5 y F13)





Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ y Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

En total, 25 % de las reflexiones se extendieron hasta una profundidad de entre 0.32 a 0.64 metros, en dirección a las fronteras de las excavaciones. 18 % ahondaron desde 0.65 hasta 0.96 metros. Las fosas que presentaron la coincidencia de los reflejos más penetrantes fueron F13¹⁰, F11 y F10, es decir, cuerpos con cobija, quemado y envuelto en bolsa plástica, respectivamente.

10 La letra F corresponde al concepto fosa mientras que, la numeración, se refiere al número de inhumación realizada en el Polígono 1.

Reflejos de una búsqueda:
el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas

Tabla 1. Fosas y profundidad de actividad electromagnética en Polígono 1

ID FOSA	UBICACIÓN DE TRANSECTO	TRATAMIENTO DE CUERPO EN FOSA	PROFUNDIDAD DE FOSA (METROS)	RELACIÓN DE REFLEXIÓN CON FOSA	PROFUNDIDAD DE REFLEXIÓN (METROS)	APROXIMACIÓN A FORMA DE REFLEXIÓN
F1	5.20	SIN CUERPO	0.75	LÍMITE INFERIOR DE FOSA	0.64 - 0.96	HIPÉRBOLA
F14	5.20	CUERPO QUEMADO	1.25	TRASCIENDE FOSA	1.60 - 1.92	HIPÉRBOLA
F4	5.20	CUERPO COMPLETO	1.25	LÍMITE SUPERIOR DE FOSA	0.64 - 0.96	ANOMALÍA
F7	5.20	CUERPO CON CAL	0.75	TRASCIENDE FOSA	1.28 - 1.60	HIPÉRBOLA
F2	11.30	SIN CUERPO	1.25	SUPERFICIAL	0.00 - 0.32	HIPÉRBOLA
F10	11.30	CUERPO DENTRO DE BOLSA	1.25	LÍMITE INFERIOR DE FOSA	1.28 - 1.60	HIPÉRBOLA
F6	11.30	CUERPO SECCIONADO	1.25	SUPERFICIAL	0.00 - 0.32	ANOMALÍA
F9	11.30	CUERPO DENTRO DE BOLSA	0.75	ANTES DE FOSA	0.32 - 0.64	ANOMALÍA
F15	17.00	REDUCCIÓN ESQUELÉTICA	0.75	LÍMITE INFERIOR DE FOSA	0.96 - 1.28	HIPÉRBOLA
F12	17.00	CUERPO CON COBIJA	1.25	ANTES DE FOSA	0.32 - 0.64	ANOMALÍA
F3	17.00	CUERPO COMPLETO	0.75	ANTES DE FOSA	00.00 - 0.32	ANOMALÍA
F11	17.00	CUERPO CON COBIJA	0.75	TRASCIENDE FOSA	2.24 - 2.90	HIPÉRBOLA
F16	23.00	REDUCCIÓN ESQUELÉTICA	1.25	ANTES DE FOSA	0.32 - 0.64	ANOMALÍA
F8	23.00	CUERPO CON CAL	1.25	ANTES DE FOSA	0.64 - 0.96	HIPÉRBOLA
F5	23.00	CUERPO SECCIONADO	0.75	ANTES DE FOSA	0.32 - 0.64	HIPÉRBOLA
F13	23.00	CUERPO QUEMADO	0.75	TRASCIENDE FOSA	1.60 - 1.92	ANOMALÍA

Nota: la columna “Relación de reflexión con fosa” describe cualitativamente la profundidad detectada en los radargramas.
Fuente: elaboración de la Dirección de Análisis y Contexto de la COBUPEJ.

En contraste, F2 y F6 (inhumación de control y fosa con porcino seccionado) no mostraron reflejos en correspondencia con la superficie.

En F1, F10 y F15 (inhumación de control, porcino con bolsa plástica y reducción esquelética), la reflexión se registró justo a los costados del límite inferior de las fosas, configurando una formación sutilmente aproximada a la hipérbola ó parábola.

F4 (cuerpo completo) evidenció un reflejo, tenuemente anómalo, que llegó al límite superior de la inhumación.

Los cuerpos contenidos en F9, F12, F3, F16, F8 y F5 (con bolsa plástica, cobija, completo, reducción esquelética, cal y seccionado, respectivamente) mostraron la formación de las ondas en dirección a su ubicación, pero su actividad concluyó antes de alcanzar la profundidad donde se depositaron los porcinos.

Por su parte, F14, F7, F11 y F13 (cuerpo quemado, con cal, cobija, quemado) exhibieron reflejos ligeramente hiperbólicos, pero que les trascendieron: es decir, que siguieron penetrando a una profundidad mayor al sitio de ubicación de los porcinos.

En suma, 56 % de los reflejos se apreciaron con una ligera aproximación a una forma hiperbólica — sin que se registre información significativa que permita afirmar la existencia de esta clase de anomalía en los resultados —.

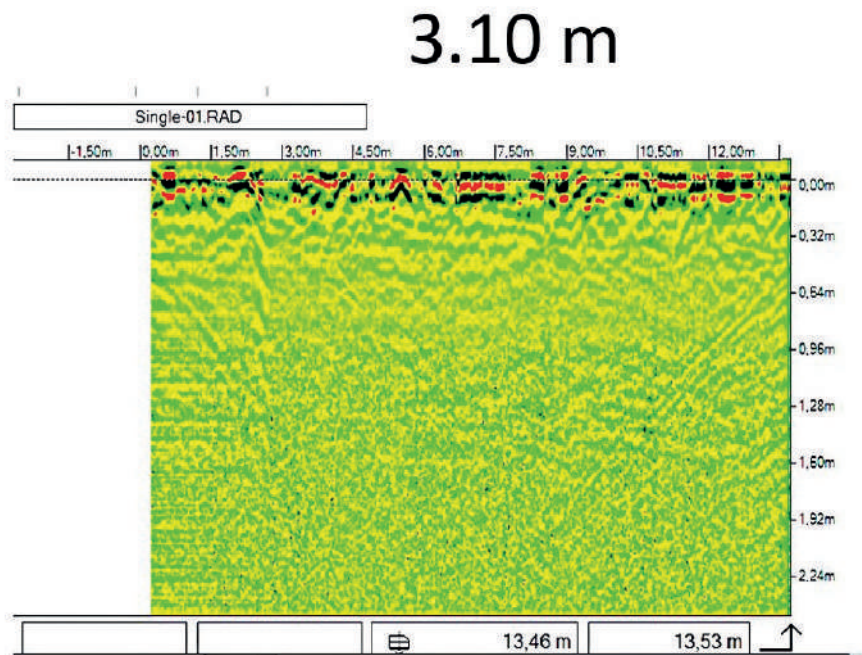
Así, en los transectos de las inhumaciones se distinguieron formaciones que coinciden con la ubicación de los confines laterales de las fosas: específicamente, en 87.5 % de éstas, la reflexión tuvo continuidad más allá del suelo visible del Polígono 1.

Sin embargo, se reconoce que son movimientos electromagnéticos desde la superficie, no anomalías producidas al nivel de los porcinos. Es decir, se encontrarían más relacionados con la presencia de porosidades ó materiales sueltos, derivados de las alteraciones realizadas en el terreno para elaborar las fosas.

A diferencia de los comportamientos descritos, en los transectos de control, los radargramas no expresaron reflexiones prolongadas de ondas. Únicamente se presentó un reflejo en la franja trazada a ocho metros de distancia del punto de origen, extendiéndose desde la superficie y hasta la máxima profundidad analizada (Figura 8).

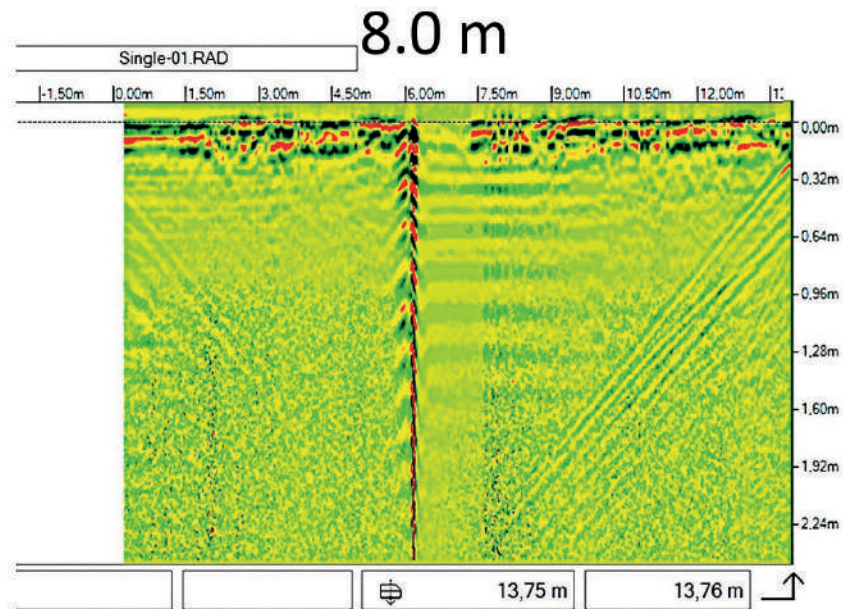
Reflejos de una búsqueda:
el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas

Figura 7. Radargrama de transecto ubicado a 3.10 metros del punto de origen (control)



Fuente: elaboración del Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

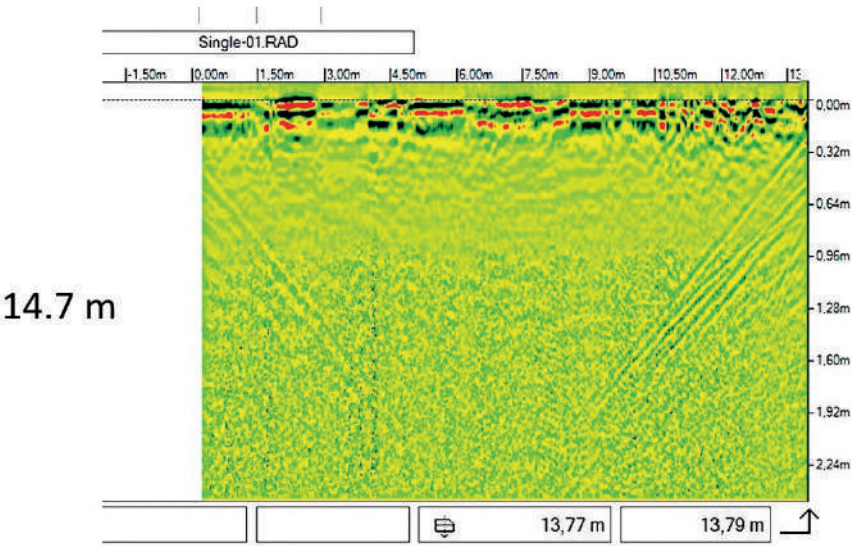
Figura 8. Radargrama de transecto ubicado a 8.0 metros del punto de origen (control)



Fuente: elaboración del Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

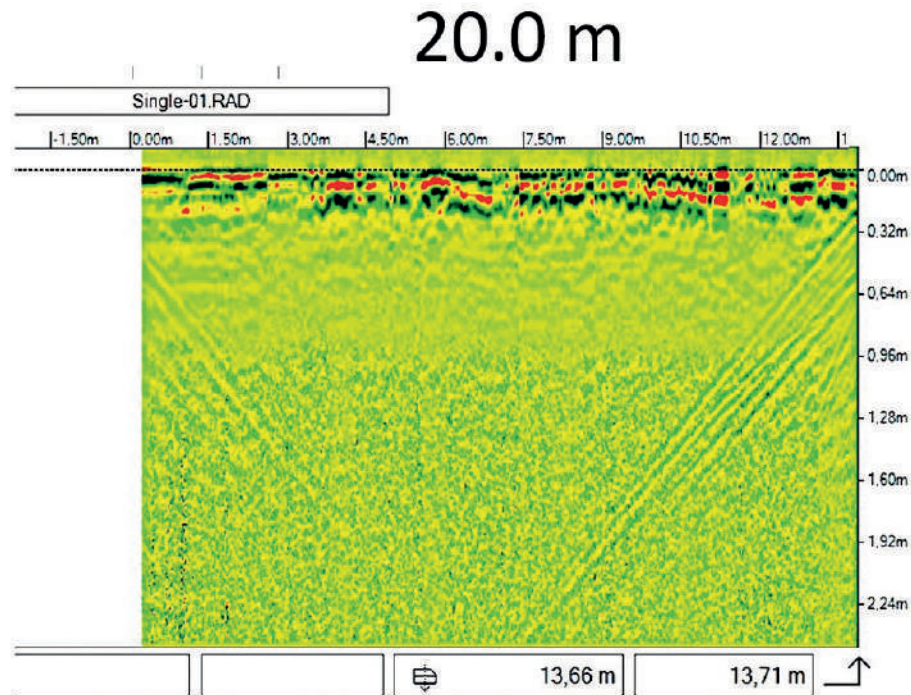
Reflejos de una búsqueda:
el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas

Figura 9. Radargrama de transecto ubicado a 14.7 metros del punto de origen (control)



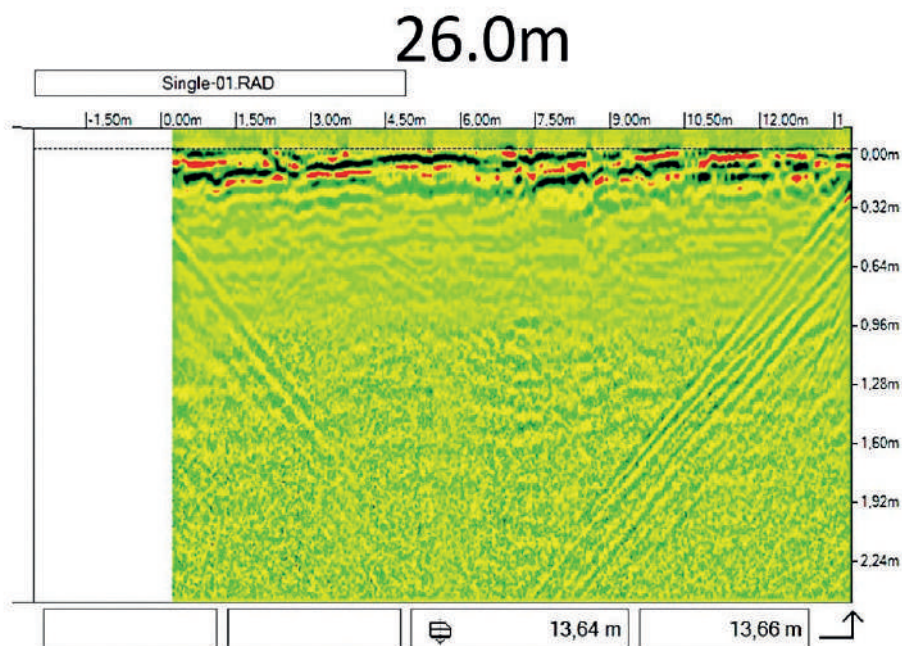
Fuente: elaboración del Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ)

Figura 10. Radargrama de transecto ubicado a 20.0 metros del punto de origen (control)



Fuente: imagen tomada del Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

Figura 11. Radargrama de transecto ubicado a 26.0 metros del punto de origen (control)



Fuente: elaboración del Departamento de Búsqueda y Recuperación del Centro de Identificación Humana de Jalisco (CIHJ).

V. Conclusiones

A partir del análisis del comportamiento electromagnético en el Polígono 1, a través del uso del Radar de Penetración Terrestre implementado en nueve transectos (correspondientes a cuatro líneas de fosas y cinco franjas de control), la experimentación con alcance exploratoria, mostró que la descomposición de los cuerpos se aprecia en tres profundidades:

- Estrato A, ubicado de los 0.00 a los 0.15 metros.
- Estrato B, de los 0.16 a los 0.96 metros.
- Estrato C, que abarca de los 0.97 a 2.90 metros.

Dichas divisiones se encuentran presentes, como una constante en los distintos transectos. Sólo en el caso de la línea situada a ocho metros del punto de origen se traza una interrupción transversal de la estratificación.

La definición de los estratos que presentan modificaciones en el comportamiento electromagnético del Polígono 1 es congruente, además, con los cambios en las tonalidades de los suelos del área, los cuales se alteran conforme avanza su profundidad.

En los estratos B y C se detectó insuficiencia de datos. En ese sentido, se registra la pertinencia de modificar la frecuencia de las antenas utilizadas en sondeo.

Ocho de cada 10 fosas simuladas presentaron una coincidencia entre los límites de su ubicación y la formación de un reflejo electromagnético que penetró por debajo de la superficie, aún con la predominancia de suelos limoarcillosos — que, históricamente, han representado un obstáculo para el registro de los sondeos en georradar —. Es decir, se encontró un comportamiento similar al descrito en investigaciones previas, que narran la factibilidad del método GPR para, principalmente, localizar la delimitación de oquedades.

No obstante, se reconoce que el grueso de las reflexiones se origina desde el suelo visible, por lo que se descartan como anomalías producidas al nivel de donde se encuentran inhumados los porcinos.

Si bien la actividad reflexiva no alcanza dimensiones significativas, a nivel exploratorio se aporta que, 56 % de los reflejos mostraron una sutil curvatura a manera de hipérbola, en coincidencia con la literatura existente que prevé esta distribución de la onda al detectar objetos de interés.

Al respecto es necesario acotar que esta forma también se manifestó en uno de los transectos de control, sin fosas, de manera que la tendencia debe tomarse con reserva.

Aunado, es de destacar, la presencia se apreció de manera indistinta en los diferentes tratamientos que tuvo cada uno de los porcinos utilizados, por lo que las variables que representan los cuerpos no se asumirían como factores de influencia.

Esta conclusión, sumada al lugar de origen de las reflexiones en el Polígono 1, sugiere que el comportamiento de las ondas se encuentra más relacionado a la detección de remociones de tierra que a la degradación de cuerpos, por lo menos, en el caso de inhumaciones pequeñas.

Sin embargo, se reitera la importancia de propiciar estudios a profundidad sobre la prospección geofísica con el método del GPR, en un escenario donde sea posible solventar



(con recursos humanos y materiales adecuados, en la etapa de procesamiento de datos), la concurrencia de materiales en el subsuelo que generan posibles distorsiones. Aunado a una mayor cantidad de sondeos, en periodos de investigación más prolongados, para alcanzar niveles correlacionales o hasta explicativos.

Al mismo tiempo, se detecta la necesidad de estudiar el comportamiento electromagnético con múltiples víctimas, debido a que, a mayor dimensión de cuerpos, podrían registrarse cambios geofísicos perceptibles y directamente relacionados a la descomposición.

Los métodos geofísicos de medición permiten la aplicación práctica de comportamientos naturales que, por su condición, son fácilmente desapercibidos.

El alcance de su éxito se construye con la confluencia de diversos factores, como una composición de suelos con poca presencia de arcilla húmeda, la búsqueda de probables cuerpos que cuenten con más de medio año de descomposición, así como el deseable conocimiento de las características del sitio a prospectar, de forma que se descarten objetos con propiedades de resistividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética que puedan afectar la precisión de la localización de fosas clandestinas.

La interpretación del electromagnetismo, y cómo se interrelaciona con otras áreas del conocimiento, así como técnicas de búsqueda, aún muestra amplios retos para su comprensión. Más aún, debido a la sutilidad en la que se expresa, en los casos donde se localizan cuerpos inhumados.

Cada comportamiento de la reflexión exige un exhaustivo análisis que, desde la mirada geológica, pero en compañía de la visión transdisciplinaria, acerque a la posibilidad de restituir a las víctimas que aún hacen falta.

El presente artículo fue dictaminado a doble ciego por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt). En el ejercicio se subrayó la importancia de describir el procesamiento de datos y la narración de tales etapas. No obstante, diferentes complejidades técnicas y humanas imposibilitaron solventar esta observación.

Se hace hincapié en el enfoque exploratorio del texto y, aunado, se resalta la importancia de, en futuras investigaciones, describir con claridad el tratamiento de la información que refleja la respuesta electromagnética del suelo.

Referencias

- ANNAN, A. P. (2009). *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*. En H. M. Jol (Ed), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 1-37). Elsevier.
- 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>
- BEREZOWSKI, V., MOFFAT, I., SECKINER, D., CREBERT, I., ELLIS, J. Y MALLETT, X. (2024). *The suitability of using domestic pigs (Sus spp.) as human proxies in the geophysical detection of clandestine graves*. Journal of Forensic Sciences 69, 316-328 <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15419>
- CACCAVARI-GARZA, A., QUIROZ-SUÁREZ, D., CIFUENTES-NAVA, G., CÁRDENAS-SOTO, M., & ESCOBEDO-ZENIL D. (2020). *Prospección geofísica somera aplicada en búsqueda forense, en M. Quinto (Coord.), En Protocolos basados en evidencia para la búsqueda de personas desaparecidas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- CASSIDY, N. (2009). *Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids*. En H. M. Jol (Ed), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 141-172). Elsevier.
- FERRER, M. (2020). *El georradar localiza cuatro posibles fosas de represaliados de la Guerra Civil*. Radio Gandia. https://cadenaser.com/emisora/2020/02/28/radio_gandia/1582897149_283567.html
- MOLINA, C. (2014). *Aportes de la geología forense en la investigación criminal en Colombia*. Geología Colombiana, 37, 171-178.
- MOLINA, C. (2016). *Metodología para la búsqueda de fosas a partir de la interpretación de anomalías en los datos obtenidos mediante la aplicación geofísica de alta resolución*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56319?show=full>
- OLARTE, W., BOTERO, M. & CAÑON B. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Scientia et Technica, 2 (45), 223-226. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4546591>
- QUIROZ, D. (2020). *Métodos de explotación geofísica somera aplicados para la caracterización de inhumaciones: caso experimental y real*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM.

- RIVERA, A. (1994). *Un radar de cadáveres*. El País. https://elpais.com/diario/1994/03/09/internacional/763167608_850215.html?event_log=go
- 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/>
- TALAVERA, J., ROJAS, J. & ORTEGA, J. (2000). *Proyecto de antropología forense: el radar de penetración en contextos forenses: una herramienta geofísica para la investigación. intradisciplinaria*. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/diariodecampo/article/view/8371/9152>

Percepción **remota**



