



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Metodología para la búsqueda de fosas a partir de la interpretación de anomalías en los datos obtenidos mediante la aplicación geofísica de alta resolución**

**Carlos Martín Molina Gallego**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Bogotá, D.C. Colombia

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**

**Carlos Martín Molina Gallego**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:  
**Doctor en Geociencias**

Director  
Ph.D., Geólogo Orlando Hernández Pardo  
Codirector  
Ph.D., Geólogo Jamie Pringle

Línea de Investigación  
Geofísica Forense

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias  
Departamento de Geociencias  
Bogotá, D.C. Colombia  
2016



*Dedicatoria*

A las personas que mantienen la esperanza de  
encontrar a sus seres desaparecidos

A mi mamá y a mi esposa, por su infinito amor



## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Colombia, por la formación recibida, y el apoyo a través del Centro Agropecuario Marengo, que me facilitó el terreno para el montaje del laboratorio experimental en área rural. De igual forma, al Departamento de Geociencias por el préstamo del equipo de geoelectrónica, y al área curricular por el subsidio para 3 salidas de campo y el respaldo a la pasantía en Keele University, cuyos tiquetes se pudieron obtener gracias a la “Convocatoria del Programa Nacional de Internacionalización del Conocimiento 2013-2015”. A la Universidad de Los Llanos, que me permitió hacer el laboratorio experimental en zona semirural en la Granja Experimental Barcelona. A la empresa Geosense SAS, que me prestó el GPR. A la empresa Sandox Científica Ltda., que me prestó el equipo de inducción electromagnética. A Equitas, por su apoyo económico para iniciar la investigación.

Al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, donde hicieron los análisis de las muestras recolectadas en las fosas. Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, por facilitarme la información de las estaciones meteorológicas ubicadas en Corpoica Tibaitata y Unillanos. A la Asociación Colombiana de Antropología Forense, que me donó los restos óseos para el experimento. Al Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, por el año para comisión de estudios. A la International Union of Geological Sciences-Initiative on Forensic Geology, por la motivación y respaldo para continuar desarrollando la geología forense en Colombia.

A todos los medios de comunicación que colaboraron con la difusión de esta investigación, tanto en la web, como en medios impresos, y en televisión.

Al profesor Orlando Hernández Pardo, por sus ideas y revisión final de la tesis, así mismo por la oportunidad para tener funciones de interventor como estudiante durante un semestre, lo cual fue un apoyo para seguir autofinanciándome el programa de doctorado. Al profesor Jamie Pringle, por sus gestiones para tramitar la beca Santander, que fue el apoyo económico para sostenerme en el

Reino Unido durante la pasantía, en la cual me familiarizó con el uso de equipos que se utilizan en geofísica forense, y me facilitó bastante literatura; de igual manera, por su constante apoyo para divulgar los resultados de la investigación a través de artículos que me revisó y complementó.

A Miguel Saumett, por el acompañamiento a campo a tomar los datos con el GPR que siempre me presto de forma incondicional, y su apoyo desde un comienzo a la investigación realizada: también, por enseñarme el manejo y procesado de los datos del GPR. A Alvaro Sandoval y Paloma Sandoval, por su generosidad con el préstamo del Profiler 400 y su interés en el desarrollo del tema.

A Jhony Fajardo y Andrés Maldonado, que siempre fueron muy colaboradores y me facilitaron todo lo que estuvo a su alcance para poder realizar el monitoreo a las fosas en el Centro Agropecuario Marengo. A Álvaro Gutiérrez, quién de igual forma me apoyó y fue siempre muy servicial durante el tiempo que estuve haciendo las mediciones en la Granja Experimental Barcelona.

A Jorge Sánchez, por su colaboración con la autorización para el análisis de las muestras de suelos. A Diego Aguilera y Cristóbal Quiroga, quienes me facilitaron los datos de las estaciones meteorológicas. A la profesora Cristina Dimaté, quién me escuchó y facilitó la legalización de los avances de tres salidas a campo que realicé con el apoyo económico del área curricular de geociencias. A Jesús Delgado, por la corrección de estilo a los capítulos de la tesis, y a Soledad Montaña quién lo hizo posible. A la profesora Cristina Garzón, quien al inicio del doctorado sugirió alternativas para buscar posibles fuentes de financiamiento y apoyo. Al profesor Manuel Moreno, quien de igual forma estuvo aportando ideas en un comienzo con relación a los sitios para realizar el experimento.

A Mario Cuellar, quien siempre estuvo pendiente del desarrollo de la tesis y atento a colaborar. A William Romero, por resolver mis inquietudes sobre las experiencias del grupo de exhumaciones de la Fiscalía y el respaldo al trabajo. A César Sanabria, por la donación de los restos óseos. Al capitán Mauricio Marín, que me facilitó las vainillas para el montaje experimental. A Giovanna, Karina, Patricia y Carlos, que siempre me colaboraron de forma amable en el Departamento de Geociencias con los trámites del préstamo del equipo de geoeléctrica. A las personas que hacen



posible que el uso del software Terrasurveyor y Magmap sean de uso libre. A Alejandro Pérez por su colaboración en la presentación final.

A mi familia, que siempre me ha respaldado y brindado todo su amor y afecto, especialmente a mi mamá.

A mi esposa Yuly Carolina, por toda su entrega, esfuerzo, paciencia, apoyo y trabajo en la elaboración de la tesis.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Problema de la investigación .....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Objetivos .....	4
1.5.1 General.....	4
1.5.2 Específicos .....	4
1.6 Metodología .....	5
1.7 Esquema.....	5
1.8 Delimitaciones de los alcances.....	6
1.9 Conclusión .....	6
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Revisión de la literatura.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introducción .....	7
2.2 Modelo geológico conceptual de una fosa .....	9
2.3 Métodos geofísicos.....	10
2.3.1 Radar de Penetración del Terreno (GPR).....	11
2.3.2 Magnetometría. Susceptibilidad magnética .....	12
2.3.3 Electromagnetismo (EM). Conductividad.....	12
2.3.4 Resistividad eléctrica .....	13
2.4 Ventajas y desventajas de los métodos geofísicos utilizados.....	14
2.5 Conclusión .....	16
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>17</b>
<b>3. Metodología .....</b>	<b>17</b>
3.1 Introducción .....	17
3.2 Localización de los laboratorios de simulación .....	18
3.2.1 Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia. Municipio de Mosquera, Sabana de Bogotá.....	18
3.2.2 Granja Experimental Barcelona, de la Universidad de Los Llanos. Municipio de Villavicencio, departamento del Meta.....	20
3.3 Diseño experimental.....	22

3.3.1	Simulación de ocho fosas clandestinas en el Centro Agropecuario Marengo ..	22
3.3.2	Simulación de cuatro fosas clandestinas en la Granja Experimental Barcelona	25
3.4	Consideraciones bioéticas .....	27
3.5	Muestreo y adquisición de datos .....	28
3.5.1	Suelos .....	28
3.5.2	Vegetación .....	28
3.5.3	Pluviosidad y temperatura .....	29
3.5.4	Métodos geofísicos .....	30
3.6	Conclusión .....	37
<b>Capítulo 4.....</b>		<b>39</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>39</b>
4.1	Introducción .....	39
4.2	Suelos .....	40
4.2.1	Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera .....	40
4.2.2	Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio .....	41
4.3	Vegetación .....	42
4.3.1	Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera .....	42
4.3.2	Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio .....	44
4.4	Pluviosidad y temperatura.....	45
4.5	Métodos geofísicos .....	46
4.5.1	GPR.....	47
4.5.2	Susceptibilidad magnética.....	57
4.5.3	Conductividad del suelo.....	64
4.5.4	Resistividad eléctrica .....	71
4.5.5	Resumen de los resultados obtenidos del monitoreo de las fosas simuladas durante el periodo de estudio .....	78
4.5.6	Modelos comparativos de enterramientos en Colombia y países del hemisferio norte	81
4.6	Conclusión .....	83
<b>Capítulo 5.....</b>		<b>85</b>
<b>5.</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>85</b>
5.1	Introducción .....	85
5.2	Comparación de los métodos geofísicos utilizados para determinar las anomalías .....	87
5.2.1	GPR.....	87
5.2.2	Susceptibilidad magnética.....	88
5.2.3	Conductividad eléctrica.....	90
5.2.4	Resistividad eléctrica .....	91
5.3	Efectividad de los métodos .....	92
5.4	Identificación y comparación de las fosas simuladas en las áreas de estudio .....	93
5.5	Relación de las variables suelo, pluviosidad, temperatura y profundidad, con la respuesta de los métodos geofísicos para localizar fosas.....	95
5.5.1	Suelo .....	95
5.5.2	Pluviosidad y Temperatura .....	96
5.5.3	Profundidad.....	97
5.5.4	Vegetación .....	98
5.6	Metodología del trabajo de campo con los métodos geofísicos.....	99

---

<b>Capítulo 6.....</b>	<b>101</b>
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>101</b>
6.1 Conclusiones.....	101
6.2 Recomendaciones.....	103
<b>A. Anexo: Especificaciones técnicas de los equipos que se utilizaron durante el monitoreo a las fosas simuladas. ....</b>	<b>105</b>
<b>B. Anexo: Propuesta metodológica para la búsqueda de personas desaparecidas aplicando geología forense .....</b>	<b>107</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>114</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>129</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1: Modelo geológico conceptual de una fosa con una víctima de homicidio. (Modificado de Harrison & Donnelly, 2009).....	9
Figura 3-1: a. Ubicación del Centro Agropecuario Marengo, en el Municipio de Mosquera, Cundinamarca, Colombia. Tomado de Google Earth. b. Vista panorámica del lugar del sitio de estudio. c. Delimitación del laboratorio experimental. ....	19
Figura 3-2: a. Ubicación geográfica de la Universidad de Los Llanos, a 4 km. de Villavicencio, departamento del Meta, Colombia. Tomado de Google Earth. b. Vista panorámica del sitio de estudio. c. Delimitación del laboratorio experimental. ....	21
Figura 3-3: Fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, municipio de Mosquera: a. Vista de planta de las ocho fosas clandestinas simuladas, con profundidades de 0,8 y 1,2 metros en la parte de abajo y arriba, respectivamente; b. Con cerdo; c. De control; d. Esqueleto humano; e. Huesos incinerados y con la simulación de un decapitado. ....	23
<b>Figura 3-4:</b> Fosas simuladas en Granja Experimental Barcelona, Villavicencio. <b>a.</b> Vista de planta de las cuatro fosas clandestinas simuladas a una profundidad de 0,50 metros; <b>b.</b> Con cerdo; <b>c.</b> De control; <b>d.</b> Esqueleto humano; <b>e.</b> Huesos incinerados y no incinerados. ....	25
<b>Figura 3-5:</b> Estaciones meteorológicas del Ideam. <b>a.</b> Centro de Investigación Agropecuario de Tibaitatá, Mosquera. <b>b.</b> Granja Experimental Barcelona, Villavicencio. ....	29
<b>Figura 4-1:</b> Secuencias del crecimiento de la vegetación en el Centro Agropecuario Marengo. <b>a.</b> Semana 6, delimitación de las fosas menos profundas; <b>b.</b> Semana 8, plantas sobre fosas y pasto separándolas; <b>c.</b> Semana 15, rábano silvestre en gran parte del área de estudio; <b>d.</b> Semana 15, pasto kikuyo en medio de las fosas. ....	43
<b>Figura 4-2:</b> Secuencias del crecimiento de la vegetación en la Granja Experimental Barcelona. <b>a.</b> Cinco semanas después del enterramiento no hay vegetación sobre las fosas; <b>b.</b> En la semana 17 comienza el pasto <i>Brachiaria decumbes</i> a crecer entre las fosas y sobre parte de ellas; <b>c.</b> En la semana 34 se observan las especies <i>Malvaceae</i> y <i>Petiveria alliacea</i> , que crecieron sobre las fosas simuladas. ....	44
<b>Figura 4-3:</b> Datos promedio mensuales de pluviosidad y temperatura de la estación meteorológica del Centro de Investigación Corpoica-Ideam, ubicada a ~ 1 kilómetro del Centro Agropecuario Marengo. ....	45
<b>Figura 4-4:</b> Datos promedio mensuales de pluviosidad y temperatura de la estación meteorológica Unillanos-Ideam, ubicada a ~ 0,5 kilómetros de la Granja Experimental Barcelona. ....	46
<b>Figura 4-5:</b> Secuencia seleccionada de los perfiles 2D con antena de 250 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: <b>a.</b> 4 semanas; <b>b.</b> 15 semanas; <b>c.</b> 19 semanas; <b>d.</b> 22 semanas; <b>e.</b> 33 semanas; <b>f.</b> 38 semanas. Las flechas muestran la posición del objetivo.....	49

**Figura 4-6:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,80 metros de profundidad con antenas de 250 MHz y 500 MHz, tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y, **f.** 66 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble..... 50

**Figura 4-7:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 1,20 metros de profundidad, con antenas de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y, **f.** 66 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble..... 51

**Figura 4-8:** Secuencia seleccionada de los perfiles 3D con antena de 250 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 4 semanas; **b.** 15 semanas; **c.** 19 semanas; **d.** 22 semanas; **e.** 33 semanas y, **f.** 38 semanas después del entierro. Los puntos delimitan las fosas. .... 52

**Figura 4-9:** Secuencia seleccionada de los perfiles 3D con antena de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y, **f.** 66 semanas después del entierro. Los puntos delimitan las fosas. .... 53

**Figura 4-10:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,50 metros de profundidad con antenas de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 1 semana; **b.** 13 semanas; **c.** 17 semanas; **d.** 21 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble. .... 55

**Figura 4-11:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,50 metros de profundidad, con antenas de 250 MHz y 500 MHz, tomados sobre las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 25 semanas; **b.** 34 semanas; **c.** 38 semanas; **d.** 43 semanas, después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble. .... 56

**Figura 4-12:** Mapas de susceptibilidad magnética de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 52 semanas; **b.** 68 semanas; **c.** 74 semanas; **d.** 78 semanas; **e.** 82 semanas después del enterramiento, respectivamente. .... 58

**Figura 4-13:** Mapas de susceptibilidad magnética de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 86 semanas; **b.** 90 semanas; **c.** 94 semanas; **d.** 98 semanas; **e.** 103 semanas después del enterramiento, respectivamente. .... 59

**Figura 4-14:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 1 semana; **b.** 5 semanas; **c.** 9 semanas; **d.** 13 semanas después del enterramiento, respectivamente..... 61

**Figura 4-15:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 17 semana; **b.** 21 semanas; **c.** 25 semanas; **d.** 30 semanas después del enterramiento, respectivamente. .... 62

**Figura 4-16:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 34 semanas; **b.** 38 semanas; **c.** 43 semanas; **d.** 47 semanas después del enterramiento, respectivamente. .... 63

**Figura 4-17:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 52 semanas; **b.** 68 semanas; **c.** 74 semanas; **d.** 78 semanas; **e.** 82 semanas después del enterramiento, respectivamente. .... 65

<b>Figura 4-18:</b> Mapas de conductividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 86 semanas; <b>b.</b> 90 semanas; <b>c.</b> 94 semanas; <b>d.</b> 98 semanas; <b>e.</b> 103 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	66
<b>Figura 4-19:</b> Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 1 semana; <b>b.</b> 5 semanas; <b>c.</b> 9 semanas; <b>d.</b> 13 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	68
<b>Figura 4-20:</b> Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 17 semanas; <b>b.</b> 21 semanas; <b>c.</b> 25 semanas; <b>d.</b> 30 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	69
<b>Figura 4-21:</b> Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 34 semanas; <b>b.</b> 38 semanas; <b>c.</b> 43 semanas; <b>d.</b> 47 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	70
<b>Figura 4-22:</b> Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 52 semanas; <b>b.</b> 55 semanas; <b>c.</b> 59 semanas; <b>d.</b> 63 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	72
<b>Figura 4-23:</b> Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 68 semanas; <b>b.</b> 74 semanas; <b>c.</b> 82 semanas; <b>d.</b> 86 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	73
<b>Figura 4-24:</b> Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 90 semanas; <b>b.</b> 94 semanas; <b>c.</b> 103 semanas después del enterramiento, respectivamente. ....	74
<b>Figura 4-25:</b> Mapas de resistividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 5 semanas; <b>b.</b> 9 semanas; <b>c.</b> 13 semanas; <b>d.</b> 17 semanas; <b>e.</b> 21 semanas después del entierro, respectivamente. ....	76
<b>Figura 4-26:</b> Mapas de resistividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). <b>a.</b> 25 semanas; <b>b.</b> 34 semanas; <b>c.</b> 43 semanas; <b>d.</b> 47 semanas después del entierro, respectivamente. ....	77
<b>Figura 4-27:</b> Esquema de, <b>a.</b> enterramiento en fosa clandestina típica en Colombia; <b>b.</b> escenario en países del hemisferio norte (Modificado de Pringle <i>et al.</i> , 2012). ....	82
<b>Figura 4-28:</b> Esquema de, <b>a.</b> enterramiento en fosa clandestina Granja Experimental Barcelona; <b>b.</b> enterramiento en fosa clandestina Centro Agropecuario Marengo (modificado de Pringle <i>et al.</i> , 2012). ....	83
<b>Figura 5-1:</b> Histograma con la semicuantificación de la efectividad de cada método en el ambiente rural del Centro Agropecuario Marengo. ....	94
<b>Figura 5-2:</b> Histograma con la semicuantificación de la efectividad de cada método en el ambiente semirural de la Granja Experimental Barcelona. ....	94



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Métodos y propiedades físicas de interés en esta investigación (Kearey <i>et al.</i> , 1991).	10
<b>Tabla 2-2:</b> Comparación de las ventajas y desventajas de los métodos geofísicos utilizados. ....	15
<b>Tabla 3-1:</b> Detalles de las ocho fosas simuladas con dimensiones, contenido y justificación. Las denominadas A1-D1 fueron cavadas a ~ 0,8 metros y las A2-D2 a ~ 1,2 metros de profundidad, respectivamente.....	24
<b>Tabla 3-2:</b> Detalles de las cuatro fosas simuladas con dimensiones, contenido y justificación. Todas las fosas fueron hechas a ~ 0,5 metros de profundidad. ....	26
<b>Tabla 3-3:</b> Resumen de la toma de datos en el Centro Agropecuario Marengo durante el periodo de estudio. Se incluye el promedio diario acumulado de temperatura. La fecha de enterramiento fue el 19 de junio de 2013. ....	30
<b>Tabla 3-4:</b> Resumen de la toma de datos en la Granja Experimental Barcelona durante el periodo de estudio. Se incluye el promedio diario acumulado de temperatura. La fecha de enterramiento fue el 23 de octubre de 2014. ....	36
<b>Tabla 4-1:</b> Textura y retención de humedad de las muestras de suelos recolectadas de las fosas simuladas en Marengo, Mosquera. Convenciones: FAr: Franco arcilloso. FL: Franco limoso. FArL: Franco arcilloso limoso. ....	41
<b>Tabla 4-2:</b> Textura y retención de humedad de las muestras de suelos recolectadas de las fosas simuladas en Granja Experimental Barcelona, Villavicencio. Convenciones: Ar: arcilloso. FAr: Franco arcilloso. ....	42
<b>Tabla 4-3:</b> Clasificación de las respuestas geofísicas en las fosas. ....	78
<b>Tabla 4-4:</b> Resumen de los resultados obtenidos al monitoreo de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo durante el periodo de estudio. ....	79
<b>Tabla 4-5:</b> Resumen de los resultados obtenidos al monitoreo de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona durante el periodo de estudio. ....	80
<b>Tabla 5-1:</b> Porcentaje de éxito de cada uno de los métodos geofísicos en la detección de las fosas en la zona rural. ....	92
<b>Tabla 5-2:</b> Porcentaje de éxito de cada uno de los métodos geofísicos en la detección de las fosas en la zona semirural. ....	93
<b>Tabla 5-3:</b> Tiempos y áreas estimadas para los métodos de prospección geofísica utilizados ....	100



## Resumen

En muchos países de Latinoamérica hay un número significativo de personas víctimas de desaparición forzada. En Colombia, por ejemplo, hay en la actualidad unos 75.000 desaparecidos, de los cuales se estima que alrededor de 21.000 lo son por desaparición forzada. Sin embargo, esta problemática también cobija a 89 países alrededor del mundo, en varios de los cuales se han reportado hallazgos de entierros tanto individuales como masivos, en distintas profundidades y ambientes.

La búsqueda de sitios de enterramiento en Colombia, tales como fosas comunes e individuales, se realiza de forma tradicional en la inmensa mayoría de casos, es decir, se hacen trincheras y se utiliza una sonda de acero inoxidable en los lugares donde los informantes indican que pueden estar los occisos, por lo cual las investigaciones judiciales muchas veces son infructuosas y permanece la incertidumbre de saber si los restos motivo de búsqueda realmente estaban o no en el sitio examinado.

El sistema judicial colombiano cuenta con solo un radar de penetración del suelo, que se comenzó a utilizar en el año 2009, de forma esporádica y empírica, sin ninguna metodología producto de investigación científica previa sobre el tema (Molina *et al.*, 2012); menos aún se tiene conocimiento de otras técnicas geofísicas como resistividad eléctrica, conductividad y susceptibilidad magnética, entre otras, complementarias para la búsqueda de fosas y objetos enterrados clandestinamente (Molina *et al.*, 2013).

Este proyecto corresponde a un trabajo experimental de geofísica forense aplicada en dos regiones del territorio colombiano, con el fin de generar nuevo conocimiento en la zona intertropical, que permita evaluar el apoyo de los métodos geofísicos en la búsqueda de personas desaparecidas. Se simularon condiciones en las que el grupo de exhumaciones de la Fiscalía General de la Nación ha encontrado tumbas, para lo cual se inhumaron esqueletos y enterraron objetos en ocho fosas de 2 por 2 metros, en medio ambiente rural, y cuatro de 1,70 por 0,70 metros en zona semirural; se

colocaron tres cerdos con medio cuerpo cubierto por prendas, tres esqueletos humanos en posición decúbito dorsal, tres con huesos quemados y representando decapitados y otros tres se dejaron como control. Se escogieron profundidades de 0,50, de 0,80 y de 1,20 metros. Se recolectaron muestras de suelos y de vegetación así como información de pluviosidad y temperatura del área del experimento. Los datos geofísicos se tomaron durante 25 meses en un área de 17 por 7 metros en la zona rural, y durante 12 meses en un espacio de 11 por 2 metros en el área semirural. Se aplicaron los métodos de georradar, susceptibilidad magnética, conductividad y resistividad eléctrica, con resultados aceptables en la zona rural, y buenos en el área semirural. Lo anterior permite recomendar el uso de ciencia y tecnología en las comisiones judiciales a través de la metodología que se obtuvo para utilizar geofísica forense.

**Palabras clave:** Geofísica forense, fosas simuladas, georradar, susceptibilidad magnética, conductividad, resistividad eléctrica.

## Abstract

In many Latin American countries there is a significant number of missing people and some of them have been victims of enforced disappearance. In Colombia, for example, there are currently about 75.000 missing people. It is estimated that approximately 21.000 of these are enforced disappearance. This problem is also present in 89 countries around the world. Several of these countries have reported findings a variety of both, individual and mass burials, at different depths and environments.

The search for burial sites in Colombia, such as mass and individual graves, in the vast majority of cases is still done in the traditional fashion, that is, making cuttings and using a stainless steel probe in the places where witnesses indicate there could be a deceased. Hence criminal investigations often have failed, leaving the uncertainty of whether or not the remains were at the site where they was sought for.

The colombian judicial system has only one ground penetrating radar which has being used since 2009 without a methodology coming from a previous scientific research on the subject, but in a sporadically and empirical fashion (Molina et al., 2012), much less is known about other geophysical techniques such as electrical resistivity, conductivity and magnetic susceptibility, among others, that are complementary to the search for graves and clandestine buried objects (Molina *et al.*, 2013).

This project is an experimental work of forensic geophysics applied in two regions of Colombia in order to generate new knowledge in the intertropical zone to assess the support of geophysical methods in the search for missing persons. Similar conditions to those the search team of the Attorney usually find when searching for graves were simulated, thus skeletons and different objects were buried in eight graves of size 2 m x 2 m in rural environment and four of size 1.70 m

x 0.70 m in a semi-rural area; three pigs with half body covered by clothing, three with human skeletons in dorsal decubitus position, three with burned bones and representing beheaded and another 3 were left as controls. Depth of 0,50 m, 0,80 m and 1,20 m were chosen. Soil and vegetation samples were collected as well as rainfall and temperature information from the experiment area was obtained. The geophysical data were collected for 25 months in an area of 17 m x 7 m in rural area and 12 months in a space of 11 m x 2 m in the semirural area. GPR methods, magnetic susceptibility, conductivity and electrical resistivity gave acceptable results in rural zone and good in the semi-rural zone. This allows us to conclude that it would be advisable the judicial commissions encharged of searching for graves used the help of science and technology through the methodology here presented on forensic geophysics.

**Key words:** Forensic geophysics, simulate graves, ground penetrating radar, magnetic susceptibility, conductivity, electrical resistivity.

# Capítulo 1

## 1. Introducción

Se presenta el conjunto de aspectos que permiten desarrollar la investigación en geofísica forense de forma integral, por lo cual se introducen algunos antecedentes, el problema crítico que se aborda, la justificación de la propuesta, la hipótesis y los objetivos del trabajo; de igual manera, se describe de forma breve la metodología, se esquematiza la tesis y se fijan algunas limitaciones.

### 1.1 Antecedentes

El uso de los métodos geofísicos en temas forenses ha tenido un amplio rango de aplicaciones desde hace varias décadas (Reynolds, 2011). Se pueden mencionar varios casos donde la exploración geofísica ha tenido éxito en los estudios forenses, como la detección de depósitos ilegales de basura tóxica con GPR y tomografía en el norte de Irlanda (Ruffell & McKinley, 2008; Ruffell & Kulsea, 2009). También la detección de minas personales (Sato *et al.*, 2004), de desastres en el mar de Barents en el año 2000 (Koper *et al.*, 2001), y el lugar de impacto del avión que cayó en Lockerbie por un atentado terrorista en diciembre de 1988 (Redmayne & Turbitt, 1990).

Sin embargo, el objetivo de buscar fosas con técnicas geofísicas comienza hacia los años setenta (Lynam, 1970; Alongi, 1973), cuando inician las primeras aplicaciones forenses (Davenport, 2001), lo cual marca el inicio de un primer periodo que va hasta finales de los ochenta, pero del que hay escasos estudios; a partir de ahí comienza un segundo periodo que va hasta los primeros

años de los noventa, donde se ve cómo el uso de las técnicas comienza a fortalecerse; por último, un tercer periodo, vigente hoy, donde se ha despertado el interés por la investigación en este campo que se ha manifestado en múltiples estudios y publicaciones (Jervis, 2010).

Trabajos de investigación para búsqueda de personas desaparecidas y objetos enterrados con métodos geofísicos han sido reseñados tanto en artículos (France *et al.*, 1992; Nobes *et al.*, 2000; Donnelly, 2002; Powell, 2004; Cheetham, 2005; Harrison & Donnelly, 2009; Jervis, 2010; Schultz & Martin, 2011; Pringle *et al.*, 2012a; Sagripanti *et al.*, 2013; Hansen *et al.*, 2013, 2014; Molina *et al.*, 2015), como en libros (Killam, 2004; Hunter & Cox, 2005; Dupras *et al.*, 2006; Ruffell & McKinley, 2008).

En la gran mayoría de países latinoamericanos, como Colombia, no se aplica la geofísica forense para la búsqueda de personas desaparecidas, de ahí que haya surgido la necesidad de aprovechar los conocimientos de las Ciencias de la Tierra y el uso de tecnología para evaluar su utilidad en la ubicación de múltiples fosas clandestinas que se encuentran en su amplia y variada geografía (Molina *et al.*, 2012). La cifra de 74.796 desaparecidos (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2015), hace indispensable acudir a métodos modernos, rápidos y eficientes que permitan indicar los sitios potenciales de enterramientos clandestinos de víctimas y posibles elementos materia de prueba o, por el contrario, descartar su presencia en un área geográfica determinada.

En consecuencia, se tiene como objetivo establecer una metodología a través de la implementación de laboratorios experimentales para la búsqueda de fosas a partir de la interpretación de anomalías en los datos obtenidos mediante la aplicación de métodos geofísicos de alta resolución (Molina, *et al.*, 2013; Caperton, 2013; Discovery Channel, 2013; Molina, *et al.*, 2015; Gallón, 2015). En estos laboratorios se trabaja con restos óseos humanos, lo que hace única tal investigación.

## 1.2 Problema de la investigación

La búsqueda de sitios de enterramiento en Colombia, tales como fosas comunes e individuales, se realiza de forma tradicional en la inmensa mayoría de casos, es decir, se hacen trincheras y se utiliza una sonda de acero inoxidable en los lugares donde los informantes indican que pueden estar los occisos, por lo cual las investigaciones judiciales muchas veces son infructuosas y permanece la incertidumbre de saber si los restos motivo de búsqueda realmente estaban o no en el sitio examinado.



En las comisiones judiciales que realizan los grupos estatales para ubicar fosas, sólo se dispone de un radar de penetración del terreno, que se utiliza de forma esporádica y empírica (Molina *et al.*, 2012); estando ausente las otras técnicas geofísicas que se desarrollan y proponen en esta investigación, las cuales son complementarias para la búsqueda de fosas y objetos enterrados de forma clandestina (Molina *et al.*, 2013).

### **1.3 Justificación**

Las profundas heridas que deja la desaparición forzada, tanto en los familiares de las víctimas como en la sociedad, requiere implementar el uso de ciencia y tecnología en Colombia como líneas de investigación fundamentales para contribuir a la solución de la violación de derechos humanos, mediante la ubicación de las fosas clandestinas que se puedan encontrar a lo largo y ancho del país y cuyas cifras, a pesar de ser diversas resultan enormes, ya que durante el año 2014 variaron según la fuente de información, desde 21.000 para el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, hasta 26.000 según la Fiscalía General de la Nación y 31.000 para la Unidad Nacional de Reparación de Víctimas (El País, 2015). Lo anterior sin olvidar las demás personas desaparecidas por causas diferentes a la mencionada.

De igual manera, la pérdida irreparable de los seres queridos para las familias genera un impacto sociojurídico, ya que es imposible definir la situación legal de los desaparecidos hasta no encontrar los cuerpos, lo cual implica, a la vez, inestabilidad en el sistema judicial.

En el ámbito internacional se requieren resultados para América Latina, donde no se ha realizado un diseño experimental con las características de las 12 fosas simuladas en esta investigación, y por lo tanto, se desconoce la respuesta de los métodos geofísicos con las variables medioambientales que tienen importancia para contribuir a detectar la presencia de anomalías (Molina, *et al.*, 2015).

La sociedad civil y el sistema judicial colombiano se beneficiarán al disponer de metodologías que contribuyan a resolver parte de la problemática de violación de los derechos humanos durante varias décadas de conflicto armado, político y social, en nuestro territorio, como la desaparición forzada, pero también dará luz a otros múltiples casos relacionados, tanto en las investigaciones judiciales que se adelantan actualmente en el país, como en las que reposan inconclusas en los

juzgados y las que no se han iniciado. Esta metodología, basada en la medición de propiedades físicas de tipo universal, tendrá aplicación en los ámbitos regional y mundial.

## **1.4 Hipótesis**

La construcción de fosas en el subsuelo altera las propiedades físicas de los materiales en la interfaz suelo-subsuelo; algunas de estas propiedades son: resistividad eléctrica, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, reflexión de ondas de radar (Telford *et al.*, 1990; Keary & Brooks, 1991). Por lo tanto, mediante la metodología propuesta se podrían detectar las geometrías de cuerpos contrastables de estas propiedades, las cuales corresponderían a anomalías geofísicas medibles con la instrumentación geofísica y podrían ser procesadas e interpretadas para apoyar los estudios de geofísica forense.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 General**

Desarrollar y aplicar una metodología funcional para identificar la presencia de fosas y objetos enterrados a partir de la detección de anomalías geofísicas, mediante técnicas o imágenes de alta resolución.

### **1.5.2 Específicos**

- Realizar una simulación controlada de campo en dos laboratorios experimentales, con ocho fosas en dos sitios geográficos diferentes de Colombia, que contengan cuerpos inhumados y objetos enterrados, que permitan obtener una respuesta geofísica a partir de las variables de profundidad de la tumba, tiempo de enterramiento, pluviosidad y textura del suelo.
- Establecer la metodología apropiada para el procedimiento de trabajo de campo con técnicas geofísicas aplicadas a la búsqueda de fosas con restos óseos aplicable en Colombia y países de la región.
- Estimar tiempos aproximados para la prospección de terrenos en búsqueda de fosas según los métodos geofísicos de GPR, resistividad eléctrica, conductividad y magnetometría.

- Optar al título de Doctor en Geociencias.

## 1.6 Metodología

Se escogieron dos sitios de estudio: uno en la sabana de Bogotá y otro en los Llanos Orientales, con características geográficas y geológicas diferentes, además de variación en los tipos de suelos y climas, variables muy importantes a tener en cuenta en el diseño experimental. En total se simularon 12 fosas, en tres de las cuales se enterraron cerdos muertos por medio de eutanasia; otras tres se dejaron vacías como referencia; en tres más se hicieron entierros primarios, es decir, cuerpos en posición anatómica con restos óseos humanos articulados, y en las últimas se colocaron huesos humanos desarticulados e incinerados, representando entierros secundarios. Las principales diferencias entre las fosas fueron su tamaño y profundidad. Con ello se garantiza un conocimiento controlado de la totalidad de las variables involucradas en una fosa clandestina en cuanto a tamaño, forma y contenido.

Una vez implementados los laboratorios experimentales se realizó un diseño de adquisición de geofísica de alta resolución, mediante una grilla o retícula de alta resolución, con unidad de celda de 0,25 metros y 0,50 metros, y espaciamiento entre estaciones de medida variable, de acuerdo con el método empleado. Posteriormente, se realizó la adquisición de datos mediante la aplicación de varios equipos de geofísica tales como el georradar, un equipo de resistividad eléctrica y un equipo de inducción electromagnética, con el fin de hacer una adquisición sistemática de la grilla y obtener una base de datos para ser procesados e interpretados. Como resultado, se han generado mapas que permiten la interpretación cualitativa y cuantitativa de datos y validar la utilidad de los mismos en la detección de contrastes de propiedades físicas a partir de los cuales se pueden reconstruir las condiciones de enterramiento y presencia de los objetos conocidos del laboratorio experimental, que permitieron plantear una propuesta metodológica eficiente para integrar la identificación de anomalías geofísicas relevantes para la búsqueda de fosas en Colombia.

## 1.7 Esquema

La tesis presenta seis capítulos, concatenados de la siguiente forma:

Capítulo 1. Corresponde a la introducción de la investigación, con los antecedentes de la misma, el problema y la justificación, la hipótesis, los objetivos y las limitaciones del trabajo.

Capítulo 2. Presenta una revisión de literatura relacionada con las propiedades físicas y los métodos geofísicos utilizados en aplicaciones forenses.

Capítulo 3. Describe los detalles de la metodología llevada a cabo en el diseño e implementación de los laboratorios experimentales, en dos sitios, donde se simularon las fosas clandestinas.

Capítulo 4. Especifica de forma concreta y clara los aspectos de adquisición, procesamiento e interpretación de los resultados obtenidos en el trabajo de campo.

Capítulo 5. A partir de los capítulos 3 y 4 expone la discusión de resultados y su comparación con experimentos similares.

Capítulo 6. Resume los principales resultados de la investigación y señala recomendaciones.

## **1.8 Delimitaciones de los alcances**

Se definió el cronograma de monitoreo en un periodo mínimo de un año en los sitios de los laboratorios experimentales y se limitó el número de métodos geofísicos por aplicar de acuerdo con la disponibilidad de equipos, programas y recursos financieros. La limitación no fue impedimento para realizar el monitoreo de las fosas de los dos laboratorios experimentales en forma satisfactoria de acuerdo con lo programado.

El procesamiento de datos se enfocó en obtener de la manera más rápida información sobre la geometría y propiedades físicas contrastantes en las áreas de estudio en campo, debido a las dificultades de acceso, orden público y condiciones meteorológicas a las cuales deben enfrentarse los grupos judiciales de trabajo de campo en condiciones reales, de tal forma que la aplicación de la metodología que se propone permita tomar decisiones en el mismo lugar.

## **1.9 Conclusión**

En este primer capítulo se establecieron los parámetros para presentar el reporte de la investigación sobre el nuevo conocimiento generado para la zona intertropical mediante geofísica forense. Basado en esto, el documento continúa con una detallada descripción de la investigación.

# Capítulo 2

## 2. Revisión de la literatura

Este capítulo muestra las referencias relevantes de algunos antecedentes históricos sobre las personas desaparecidas en el contexto mundial y la aplicación de los métodos geofísicos para su búsqueda, con sus ventajas y desventajas, incluidas algunas variables ambientales y características del terreno. Igualmente, se muestra de forma específica un modelo teórico desde el punto de vista geológico de una fosa.

### 2.1 Introducción

En muchos países de América del Sur hay un número significativo de personas desaparecidas y entre ellas las que han sido víctimas de desaparición forzada (Proyecto desaparecidos, 2015). Por ejemplo, en Colombia hay 74.796 personas desaparecidas, de las cuales se estima que unas 21.000 lo son por desaparición forzada (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2015). Se ha reportado de forma aislada el descubrimiento de fosas clandestinas de víctimas (Solla & Iscan, 2001; Iscan & Solla, 2005), entierros masivos (Varas & Leiva, 2012), y en variedad de estilos de entierro, profundidades y ambientes deposicionales (Solla & Iscan, 2001; Iscan & Solla, 2005; Varas & Leiva, 2012). Tales números de víctimas han sido reportados en otros lugares a escala mundial, por ejemplo, en el siglo 19 entierros masivos irlandeses (Ruffell *et al.*, 2009), víctimas de disturbios antirracistas (Witten *et al.*, 2000), entierros masivos en la Guerra Civil Española (Rioz *et al.*, 2010, Rioz *et al.*, 2012), entierros en la segunda Guerra Mundial (Fiedler *et al.*, 2009, Ossokowski, 2013), en la represión polaca después de la segunda Guerra Mundial (Szleszkowski *et al.*, 2014),

durante *troubles* en Irlanda del Norte, en su mayoría enterramientos aislados (Independent Commission, 2015), entierros masivos en la guerra de los Balcanes en la década de 1990 (Brown, 2006; Dajuric, 2007), y tristemente en las guerras civiles activas tanto en entierros aislados como masivos (Syrian Observatory for Human Rights, 2015).

Los métodos actuales de búsqueda forense para detectar entierros individuales y en masa, víctimas de asesinato, que son muy variados y ya se han referenciado (Parker *et al.*, 2010; Pringle *et al.*, 2012a), sugieren buenas prácticas y pasan desde un enfoque de gran escala con métodos de detección de sensores remotos (Kalacska *et al.*, 2009), hasta el reconocimiento inicial del suelo (Ruffell & McKinley, 2014) y los estudios iniciales de control (Harrison & Donnelly; 2009; Larson *et al.*, 2011). Estas búsquedas completas también han implicado una variedad de métodos, incluidas geomorfología forense (Ruffell & McKinley, 2014), botánica forense (Aquila *et al.*, 2014) y entomología forense (Amendt, 2007; Gennard, 2012), búsqueda con perros entrenados en olores (Lasseter *et al.*, 2003; Dupras *et al.*, 2006), sonda (Owsley, 1995; Killam, 2004; Ruffell, 2005a), tanatoquímica (Vass *et al.*, 2008; Carter *et al.*, 2008; Dekeirsschieter *et al.*, 2008), y geofísica superficial (France *et al.*, 1992; Nobes, 2000; Powell, 2004; Cheetham, 2005; Ruffell, 2005b; Schultz, 2007; Pringle & Jervis, 2010a; Novo, 2011).

Recientes investigaciones geofísicas en fosas clandestinas simuladas han encontrado métodos de detección óptima y configuraciones muy variables de acuerdo con una serie de factores, donde se destacan el tiempo del entierro, el estilo del mismo, el tipo de suelo, la vegetación y el clima (France *et al.*, 1992; Strongman, 1992; Schultz, 2006; Pringle *et al.*, 2008; Schultz, 2008; Jervis *et al.*, 2009; Juerges *et al.*, 2010; Schultz y Martin, 2011; Pringle *et al.*, 2012a; Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012b; Hansen & Pringle, 2013; Ruffell *et al.*, 2014; Pringle *et al.*, 2015). Como se informó en Molina *et al.* (2015), en América del Sur ha habido muy poca investigación con experimentos de prueba controlados para determinar las técnicas geofísicas óptimas de búsqueda y configuración de los equipos; sin embargo, en Argentina se han realizado algunas búsquedas de personas con tomografía y georradar (Sagripanti *et al.*, 2013). En Colombia hay textos importantes para contextualizar la problemática de los desaparecidos (Rodríguez, 2004; 2011; Quevedo, 2014), y el uso de algunos métodos geofísicos aplicados a la arqueología (Zuñiga & Rodríguez, 2010); pero no se conocen trabajos de investigación de las técnicas geofísicas en el campo forense, excepto el uso del GPR de forma empírica en algunos casos judiciales (Molina *et al.*, 2012), a diferencia de países como Estados Unidos (Necrosearch, 2015), Reino Unido

(Scotland Yard, 2015) y Australia (Australian Federal Police, 2015), que han organizado y fortalecido varios grupos de geofísica forense. De ahí que haya múltiples casos exitosos de hallazgos de personas desaparecidas, no solo en el subsuelo, sino también algunos bajo el agua (Ruffell, 2006; Schultz, 2013).

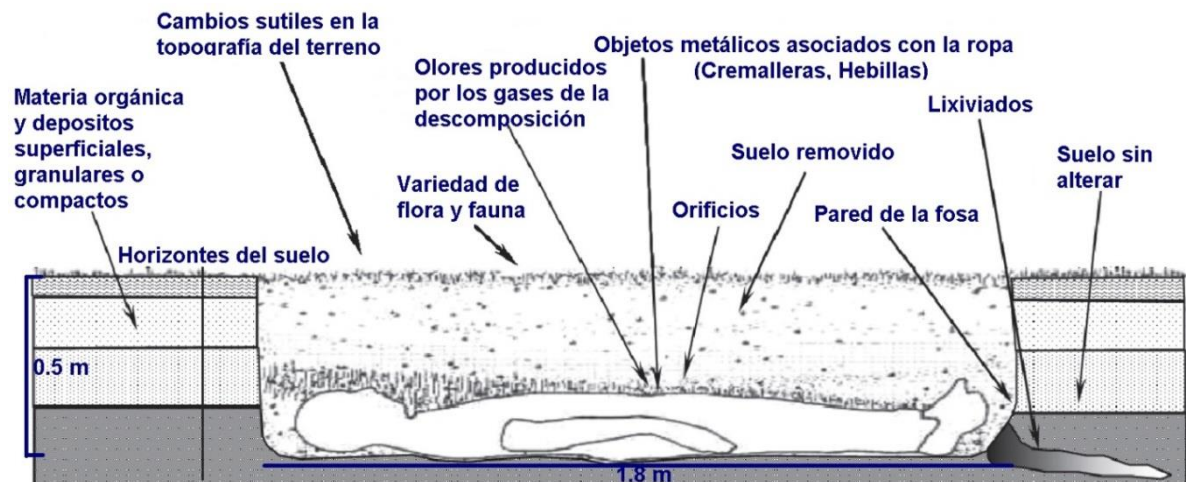
## 2.2 Modelo geológico conceptual de una fosa

De forma tradicional, la policía judicial busca fosas haciendo líneas de personas o excavaciones ensayo-error; esta labor, intensiva e ineficiente, puede destruir evidencia e ignorar perturbaciones sutiles del terreno. Sin embargo, la efectividad y costo de numeroso personal militar y voluntario caminando a través de grillas debe ser evaluada contra la eficacia de localización de los entierros (Boyd, 1979).

El modelo conceptual del terreno se realiza a partir de diferentes aspectos que dan información, tales como mineralogía, litologías, depósitos superficiales, hidrogeología, clima local, meteorización y erosión, preservación y descomposición, uso pasado y actual del suelo. Se debe estimar el tamaño, geometría, profundidad esperada y tiempo de enterramiento del objetivo por buscar (Harrison & Donnelly, 2009).

Las propiedades de geología, geomorfología, geofísica, geotecnia e hidrogeología pueden cambiar cuando un cuerpo es inhumado debido a las múltiples variables y características que esto implica (figura 2-1).

**Figura 2-1:** Modelo geológico conceptual de una fosa con una víctima de homicidio. (Modificado de Harrison & Donnelly, 2009).



## 2.3 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos están basados en la medición de las propiedades físicas de los materiales del subsuelo y detectan contrastes entre cuerpos causativos de interés y el medio que los circunda. Hay una división de métodos de prospección geofísica: los que utilizan los campos naturales de la Tierra, y aquellos que requieren introducir en el terreno una energía generada de forma artificial. Los primeros usan los campos gravitacional, magnético, eléctrico y electromagnético de la Tierra, en busca de perturbaciones locales que pueden ser causados por características geológicas ocultas de interés. Los artificiales pueden ser utilizados de forma análoga a los anteriores, pero son capaces de producir una imagen más detallada y de mejor resolución del subsuelo (Kearey *et al.*, 1991). Los métodos con su parámetro de medida y propiedad física de interés en esta investigación se detallan en la tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Métodos y propiedades físicas de interés en esta investigación (Kearey *et al.*, 1991).

<b>Método</b>	<b>Parámetro de medición</b>	<b>Propiedad física</b>
Georradar	Tiempos de viaje de los pulsos del radar que son reflejados	Constante dieléctrica
Magnético	Variaciones espaciales en la fuerza del campo geomagnético	Susceptibilidad magnética y remanente
Electromagnético	Respuesta a la radiación electromagnética	Conductividad eléctrica e inductancia
Resistividad eléctrica	Resistencia de la Tierra	Conductividad eléctrica

Las técnicas geofísicas, que comenzaron a ser usadas para exploración de petróleo y minería durante el periodo 1910-1930, en la década siguiente empezaron a utilizarse en arqueología y a partir de los años setenta se inicia su aplicación en investigaciones forenses (Davenport, 1998).

La geofísica es una alternativa muy deseable en las investigaciones con fines forenses que requieren encontrar cuerpos y objetos enterrados (Brothwell & Higgs, 1982; Ruffell & McKinley, 2005, 2008; Donnelly & Harrison, 2010; Murray, 2011; Pringle *et al.*, 2012a), por cuanto ayudan a tomar decisiones de forma rápida y confiable, más aún en Colombia, donde apenas ahora se inició su implementación de forma incipiente (Molina *et al.*, 2012). Así, el uso de tecnología para



adquirir de forma confiable datos que serán procesados con *software* especializado puede permitir interpretar con buena probabilidad la ubicación de entierros.

De ahí que el uso del radar de penetración del terreno, la resistividad, la susceptibilidad magnética, la magnetometría, la gravimetría, los sensores remotos, la fotografía aérea, se han convertido en importantes campos de investigación para la búsqueda de fosas (Fenning & Donnelly, 2004; Cheetham, 2005; Dupras, *et al.*, 2006; Ruffell & McKinley, 2008; Murray, 2011; Pringle *et al.*, 2012a,b); conductividad (Pringle *et al.*, 2010; Pringle *et al.*, 2012b).

### 2.3.1 Radar de Penetración del Terreno (GPR)

El radar de penetración del terreno (GPR) es un método electromagnético que consiste en usar la propagación y reflexión de ondas de radio en un rango de frecuencia entre 25 y 1.200 MHz, de tal forma que mida la frecuencia a partir de una antena transmisora que emite impulsos electromagnéticos desde la superficie hacia el subsuelo; la respuesta de esos pulsos es leída por una antena receptora (Beres *et al.*, 2001; Conyers, 2006; Ruffell & McKinley, 2008). Si hay suelos alterados de origen antrópico, el método de GPR dará al investigador información acerca de la intensidad, el tamaño y la forma general de la anomalía, la cual puede ser causada por la presencia de restos humanos y objetos artificialmente enterrados (Bernabini *et al.*, 1995; Nobes, 2000; Marchesi, 2001).

El GPR es un método geofísico que ha mostrado desde hace varias décadas su eficiencia en la búsqueda de evidencias enterradas en el subsuelo (Strongman, 1987). Es uno de los equipos geofísicos más utilizados por las autoridades judiciales y policías en todo el mundo para la búsqueda de evidencia enterrada en el suelo (Miller, 1996; Blum & Russo, 2011; Pringle *et al.*, 2012a), ya que presenta uno de los más altos niveles de resolución en los métodos de geofísica superficial. El GPR ha tenido éxito en numerosos experimentos controlados (France, 1992; Strongman, 1992; Schultz, 2006; Pringle *et al.*, 2008; Schultz, 2008; Jervis *et al.*, 2009; Juerges *et al.*, 2010; Schultz & Martin, 2011; Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012a; Pringle *et al.*, 2012b; Hansen & Pringle, 2013; Ruffell *et al.*, 2014), y casos penales (Ruffell, 2005b; Schultz, 2007; Pringle *et al.*, 2008; Ruffell *et al.*, 2014), pero se ha sugerido que en algunas investigaciones se ha utilizado sobre la base de los éxitos del pasado y sin tener en cuenta las condiciones de deposición local (Schultz, 2008; Jervis *et al.*, 2009). La detección de fosas con antenas de 200 y 400 MHz es sugerida por Ruffell *et al.* (2009), Mientras frecuencias de 250 y 500 MHz han sido

exitosas en investigaciones realizadas por Schultz & Martin (2011); en contraste, el GPR no ha tenido éxito en la localización de fosas en todas las condiciones (Rioz, 2010), en suelos salinos (Pringle *et al.*, 2012b), ricos en arcilla húmeda (Pringle & Jervis, 2010a, Molina *et al.*, 2015) o inconvenientes en su aplicación (Pringle *et al.*, 2012c).

### **2.3.2 Magnetometría. Susceptibilidad magnética**

Es la medida de un material susceptible de ser magnetizado (Reynolds, 2011), de ahí que se puedan detectar anomalías en función de las diferencias de los contrastes debidos a la susceptibilidad magnética. Las medidas de susceptibilidad magnética generan un campo magnético de corriente alterna de baja intensidad, que producen cambios de susceptibilidades positivas y negativas (Hansen & Pringle, 2013). Estas lecturas usualmente aumentan por combinación de minerales magnéticos como la magnetita y materiales ferromagnéticos hechos por el hombre, entre otros (Miller, 1996; Milsom & Eriksen, 2011; Reynolds, 2011).

La susceptibilidad magnética, una técnica emergente forense, ha tenido éxito en varios ambientes simulados y con diferentes objetivos enterrados (Linford, 2004; Pringle *et al.*, 2008; Milsom & Eriksen, 2011; Hansen & Pringle, 2013; Pringle *et al.*, 2015b); ha diferenciado muestras de suelo (Guedes *et al.*, 2013); pero rara vez se ha utilizado en casos forenses a pesar que es económico y práctico de usar, uno de esas investigaciones fue la ubicación de un lugar con desechos ilegales en China (Manrong *et al.*, 2009).

### **2.3.3 Electromagnetismo (EM). Conductividad**

Este método permite, de forma rápida, medir los cambios relativos en la conductividad del suelo entre los objetivos y las lecturas del nivel base de conductividad regional o *background* mediante la inducción de una corriente electromagnética, que puede detectar tanto materiales ferrosos como no ferrosos (Pringle *et al.*, 2012a). Aunque más ampliamente utilizado en casos forenses ambientales (Reynolds, 2011), ha tenido resultados mixtos en búsquedas relacionadas con casos penales (Nobes, 1999; Nobes, 2000; Bigman, 2012; Pringle *et al.*, 2012a), y ha resultado tener inconvenientes en entornos urbanos (Pringle *et al.*, 2008; Dick *et al.*, 2015). La descomposición de fluidos también ha sido encontrada temporalmente variable, pero podría ser detectada con este método (Pringle *et al.*, 2010; Pringle *et al.*, 2015a).

Es una técnica rápida para medir los cambios relativos de conductividad entre los objetos metálicos enterrados y el subsuelo, en el cual se induce una corriente eléctrica. Detecta metales ferrosos y no ferrosos (Davenport, 2001). Este método ha sido útil para localizar restos humanos dentro de ataúdes de madera y sugiere que los cuerpos de víctimas que tienen prendas y conservan en estas fluidos orgánicos secos como producto de la descomposición, pueden ser detectados con electromagnetómetro (Nobes, 2000). También se ha reportado éxito en entierros clandestinos simulados (Fence *et al.*, 1992); sin embargo, en otras investigaciones no ha sido afortunada la detección (Nobes, 1999; Pringle *et al.*, 2008).

Hay dos métodos para medir la conductividad eléctrica con fines forenses. El primero, con el objetivo de buscar fosas, para lo cual se utiliza un electromagnetómetro, y el segundo con el fin de determinar el tiempo *post mortem* a partir de los fluidos de un cuerpo en descomposición. En un monitoreo a fosas con cerdos enterrados después de tres años, se ha encontrado que para el primer año se incrementa rápidamente la conductividad, en el segundo es lenta y en el tercero decrece (Pringle *et al.*, 2012c).

### 2.3.4 Resistividad eléctrica

Es una importante propiedad eléctrica que diferencia distintos tipos de materiales, según la capacidad de cada uno de ellos para permitir o resistir el paso de corriente eléctrica, la cual es medida para determinar la presencia de agua, sedimentos, minerales y rocas; con fines forenses sirve para determinar la presencia o ausencia de entierros y vertederos de basura ilegal (Ruffell & McKinley, 2008). La resistividad eléctrica utilizada en estudios forenses puede presentar dos tipos de resultado: un sondeo vertical, donde las profundidades a diferentes estratos pueden ser interpoladas (tomografía-ERT), o una vista de plano de los cambios horizontales en resistividad (Ruffell & McKinley, 2008).

La resistividad eléctrica —el inverso de la conductividad—, ha sido ampliamente utilizada en casos forenses ambientales (Pringle *et al.*, 2012a; Reynolds, 2011), en la detección de fosas clandestinas (Pringle & Jervis, 2010a), en entierros antiguos (Dick *et al.*, 2015; Elwood, 1990), Matias *et al.*, 2006), y en experimentos controlados (France *et al.*, 1992; Cheetham, 2005; Pringle *et al.*, 2008; Jervis *et al.*, 2009; Pringle *et al.*, 2012b; Pringle *et al.*, 2012c; Pringle *et al.*, 2008); sin embargo, las principales variables del entorno ambiental pueden afectar la detección de los

objetivos, incluida la humedad del suelo (Jervis & Pringle, 2014; Hansen & Pringle, 2014), el tipo de suelo (Pringle *et al.*, 2012a; Hansen & Pringle, 2014) y la salinidad (Pringle *et al.*, 2012b).

La toma de datos con fines forenses suele hacerse a través de arreglos polo-polo con un equipo Geoscan RM15-D, bastante práctico y rápido, ya que está diseñado para obtener datos con dicho propósito, además de arqueológicos, con muy buenos resultados. También se puede adquirir la información con un Abem Terrameter 1000, y el diseño de Wenner, que ha mostrado en algunas ocasiones resultados efectivos (Ruffell & McKinley, 2008). Otro arreglo que puede medir la resistividad eléctrica del suelo es dipolo-dipolo, cuya configuración de electrodos es sugerida por Aguilera *et al.* (2006) y ha sido aplicada con éxito en Argentina mediante tomografía para ubicar una fosa de varias décadas de antigüedad (Sagripanti *et al.*, 2013). Todos los métodos mencionados ofrecen ventajas y desventajas en relación con la resolución y medición de la profundidad (Roy & Apparao, 1971), incluidos los que no han sido reportados para fines forenses, como polarización inducida, gradiente y Schlumberguer.

Las aplicaciones en polución, contaminación de aguas subterráneas, monitoreo de movimientos verticales y laterales, localización de vertederos, fugas de tuberías de agua tienen también connotación forense por formar parte de investigaciones judiciales que requieren hallar a los responsables de incumplir normas de protección al medio ambiente o no seguir normas mínimas de calidad, que han ocasionado desastres naturales y víctimas humanas (Owsley, 1995; Marchesi, 2001; Reynolds, 2011). Es importante tener en cuenta lo anterior en la búsqueda de fosas donde el suelo presenta un nivel freático alto, o cuando hay terrenos con basuras o escombros que pueden ocultar víctimas.

En un experimento realizado en Keele University, el uso del método fue útil para detectar con una anomalía de baja resistividad la fosa donde se inhumó un cerdo, y con una anomalía de alta resistividad un cerdo que fue inhumado pero envuelto en una lona. Una tercera fosa que se excavó para el estudio y permaneció vacía, no fue detectada (Jervis *et al.*, 2009).

## **2.4 Ventajas y desventajas de los métodos geofísicos utilizados**

Los métodos geofísicos son muy útiles pero también tienen limitantes, ya que no ofrecen una solución única (principio de *non-uniqueness solution*); siendo métodos indirectos, resulta importante conocer ambos aspectos para tomar una decisión acertada en el momento de realizar

una prospección geofísica, donde sea necesario escoger un equipo de acuerdo con el objetivo y condiciones ambientales. En la tabla 2-2 se muestra el resumen de las principales ventajas y desventajas que tienen los métodos de interés en esta investigación.

**Tabla 2-2:** Comparación de las ventajas y desventajas de los métodos geofísicos utilizados.

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Georradar	Los datos pueden ser vistos en tiempo real  Excelente resolución, según la frecuencia utilizada  Estimación de la profundidad y tamaño del objetivo  Buenos resultados en suelos arenosos  Posibilidad de trabajar también sobre concreto	Es costoso y requiere experiencia para recolectar, procesar e interpretar los datos  El terreno debe ser plano, sin ondulaciones  No suele detectar los objetivos en suelos arcillosos ( <i>skin effect</i> ) con alto nivel freático y, o, salino  Toma mucho tiempo cubrir áreas extensas
Magnetometría. Susceptibilidad magnética	Equipo liviano  Rápida adquisición de datos  Bajo ruido ambiental para dispositivos LIN EMI  Puede utilizarse en zonas boscosas, terrenos duros y sobre concreto	Las líneas de energía generan interferencia  El operador no debe usar ningún aparato metálico  Interferencias con cables enterrados, radiotransmisores, edificios, cercas metálicas
Electromagnetismo (EM). Conductividad	Rápida adquisición de datos  Excelente resolución espacial  Facilidad para producir mapas con los datos  Posibilidad potencial de diferenciar entre suelo alterado y no perturbado  Puede utilizarse en zonas boscosas, terrenos duros y sobre concreto	Las formas de las anomalías pueden ser complejas sobre objetos simples y conducir a una mala interpretación  Resolución vertical limitada de acuerdo con la frecuencia de la señal utilizada  El operador no debe usar ningún aparato metálico  No trabaja bien en suelos arcillosos ( <i>skin effect</i> )

**Tabla 2-2:** (Continuación).

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Resistividad eléctrica	Rápida adquisición de datos  Muestra cambios laterales en las características cercanas a la superficie del suelo  Rápido y fácil uso con baterías de bajo voltaje para evitar choques eléctricos	Errores en la separación de los electrodos afectan el factor geométrico del arreglo

## 2.5 Conclusión

En este segundo capítulo se identificaron y revisaron las dimensiones conceptuales y teóricas de la literatura, se mostró el contexto internacional de la problemática de las personas desaparecidas y las acciones realizadas para encontrarlas mediante geofísica forense a través de métodos de alta resolución, que han resultado efectivos en muchos casos. De igual manera, se presentó el modelo conceptual de una fosa como aspecto importante en el proceso de búsqueda, y las ventajas y limitantes de los métodos geofísicos.

# Capítulo 3

## 3. Metodología

En el presente capítulo se detalla la metodología seguida durante el desarrollo del diseño de los dos laboratorios experimentales que se realizaron con 12 fosas simuladas, y la adquisición de los datos con cuatro métodos geofísicos, la recolección de muestras de suelos y vegetación relacionadas como variables, además de la información de pluviosidad y temperatura obtenida de las estaciones meteorológicas. También se menciona el procesado de los datos y resultados obtenidos.

### 3.1 Introducción

Se describe el diseño experimental en dos sitios diferentes de la geografía colombiana, donde se simularon 12 fosas con el fin de obtener datos con métodos geofísicos que serán usados para dar respuesta a la hipótesis. En la sección 1.6 del capítulo 1 se proporcionó una breve introducción a la metodología; aquí se desarrolla el procedimiento con los detalles realizados en el Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia, y la Granja Experimental Barcelona, de la Universidad de los Llanos.

El capítulo está organizado alrededor de cinco temas principales: el área de estudio, el diseño experimental, las consideraciones bioéticas, el muestreo y la adquisición de datos.

## **3.2 Localización de los laboratorios de simulación**

Para simular las fosas se tuvo en cuenta que los terrenos estuvieran sobre depósitos no consolidados y blandos, por cuanto son los escogidos para cavar con mayor facilidad e inhumar a las personas por parte de los victimarios; esto también ha sido verificado en las comisiones de búsqueda que realiza el grupo de exhumaciones de la Fiscalía General de la Nación de Colombia.

Por primera vez, para un proyecto de investigación en geofísica forense, se construyeron 12 fosas a tres profundidades, con el uso de restos óseos humanos y en dos ambientes diferentes, con el propósito de abarcar las condiciones más comunes en las cuales se han encontrado personas desaparecidas en Colombia. En estudios similares se ha utilizado un número menor de fosas en condiciones también particulares y a profundidades de 50 centímetros y 1,00 metro (Freeland *et al.*, 2003; Schultz *et al.*, 2006; Schultz, 2008; Pringle *et al.*, 2008; Jervis *et al.*, 2009); de igual forma, el uso de restos óseos humanos ha tenido límite en legislaciones como las de Reino Unido, que es el líder en estudios experimentales de esta índole, mientras en Estados Unidos sí se han utilizado en algunos casos cadáveres humanos (Powell, 2004).

### **3.2.1 Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia. Municipio de Mosquera, Sabana de Bogotá.**

El sitio controlado de la investigación se ubica en las coordenadas geográficas 4°40'63'' N y 74°12'33'' W, a 2.579 metros sobre el nivel del mar, en el Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado a ~ 14 kilómetros de la carretera de occidente que comunica a Bogotá con el municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca (figura 3-1a). El lugar de estudio, en una zona rural con ecosistema neotropical de la sabana de Bogotá (figura 3-1b), tiene una temperatura promedio anual de 14 °C y una precipitación de ~ 1.124 m con dos periodos secos y dos lluviosos (IGAC, 2014). La geología local corresponde a una terraza fluvio-lacustre de la Formación Sabana con edad Pleistoceno medio a tardío (Universidad Nacional de Colombia, 2015). El tipo de suelo, un andisol con sedimentos lacustres y ceniza volcánica, tiene un horizonte superior de materia orgánica seguido de una textura franco arcillosa roja; sin embargo, el área superficial del terreno muestra variación, ya que el costado sur presenta como antecedente una superficie de materia orgánica con excrementos de gallinaza, mientras que el sector norte no, de ahí que este último se observa de color más claro que el primero; el lote tiene unas dimensiones de 20 por 10 metros (figura 3-1c).



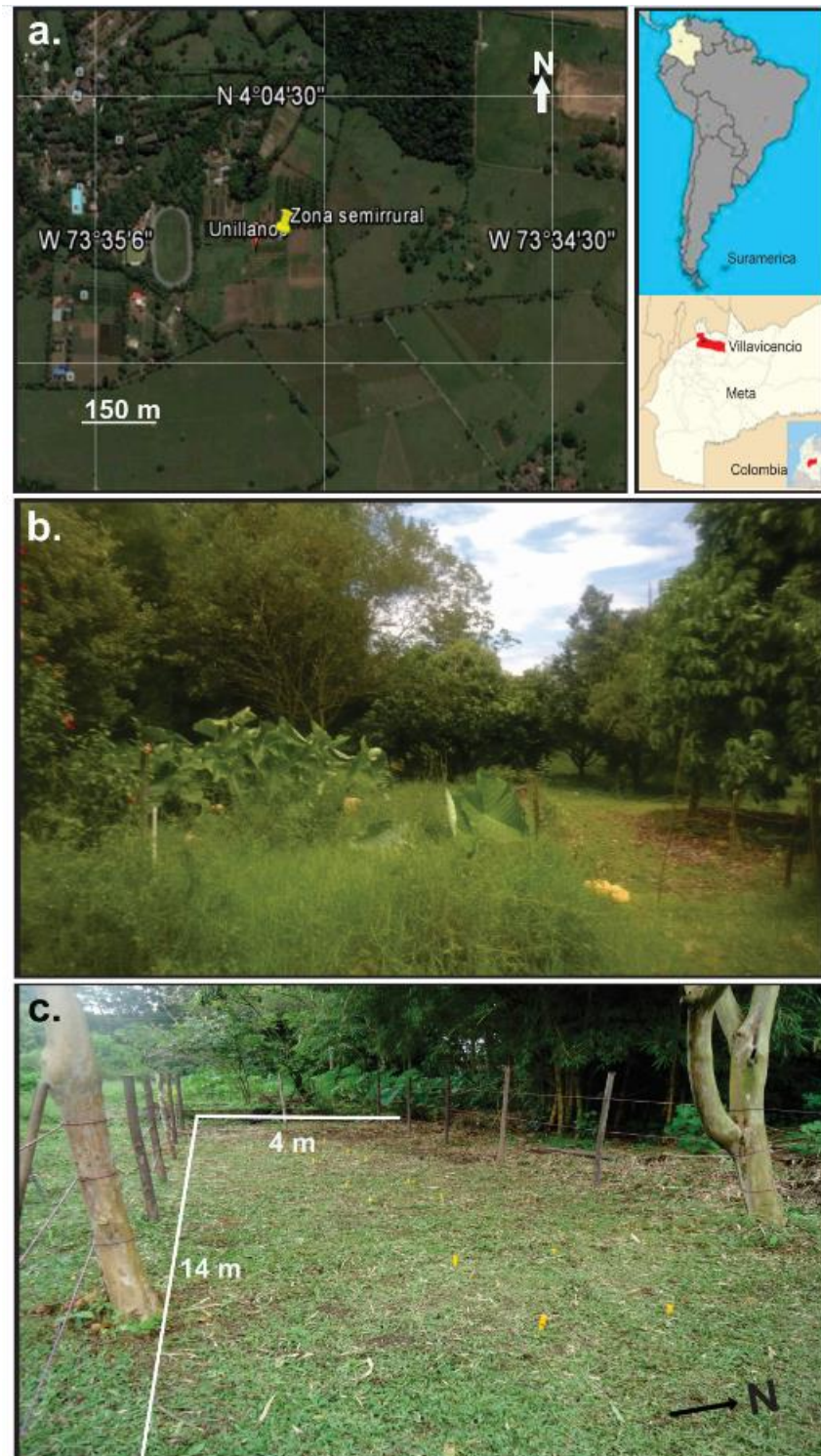
**Figura 3-1:** a. Ubicación del Centro Agropecuario Marengo, en el Municipio de Mosquera, Cundinamarca, Colombia. Tomado de Google Earth. b. Vista panorámica del lugar del sitio de estudio. c. Delimitación del laboratorio experimental.



### **3.2.2 Granja Experimental Barcelona, de la Universidad de Los Llanos. Municipio de Villavicencio, departamento del Meta.**

Las coordenadas geográficas del lugar del experimento corresponden a 4°04'47'' N y 73°35'17'' W, a 391 metros sobre el nivel del mar, en la Granja Experimental Barcelona, de la Universidad de los Llanos, ubicada ~ 100 kilómetros al oriente de la carretera que une a Bogotá con el municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta (figura 3-2a). El sitio de estudio, en un entorno tropical semirrural de los Llanos Orientales (figura 3-2b), tiene una temperatura promedio de 27 °C y precipitaciones medias anuales de 3.000 milímetros por año, con un periodo seco de diciembre a marzo, y un periodo de lluvias de abril a noviembre (IGAC, 2004). La geología local corresponde a una terraza aluvial del Holoceno. El tipo de suelo local es un entisol con sedimentos aluviales, mezcla de textura arcillosa con textura fina y fragmentos de rocas redondeadas de diferentes tamaños. El lote tiene unas dimensiones de 14 por 4 metros (figura 3-2c). La cercana estación de observación del tiempo meteorológico se encuentra a ~ 0,5 kilómetros del lugar de la prueba, que registra datos de precipitación y temperatura durante las 24 horas.

**Figura 3-2:** a. Ubicación geográfica de la Universidad de Los Llanos, a 4 km. de Villavicencio, departamento del Meta, Colombia. Tomado de Google Earth. b. Vista panorámica del sitio de estudio. c. Delimitación del laboratorio experimental.



### **3.3 Diseño experimental**

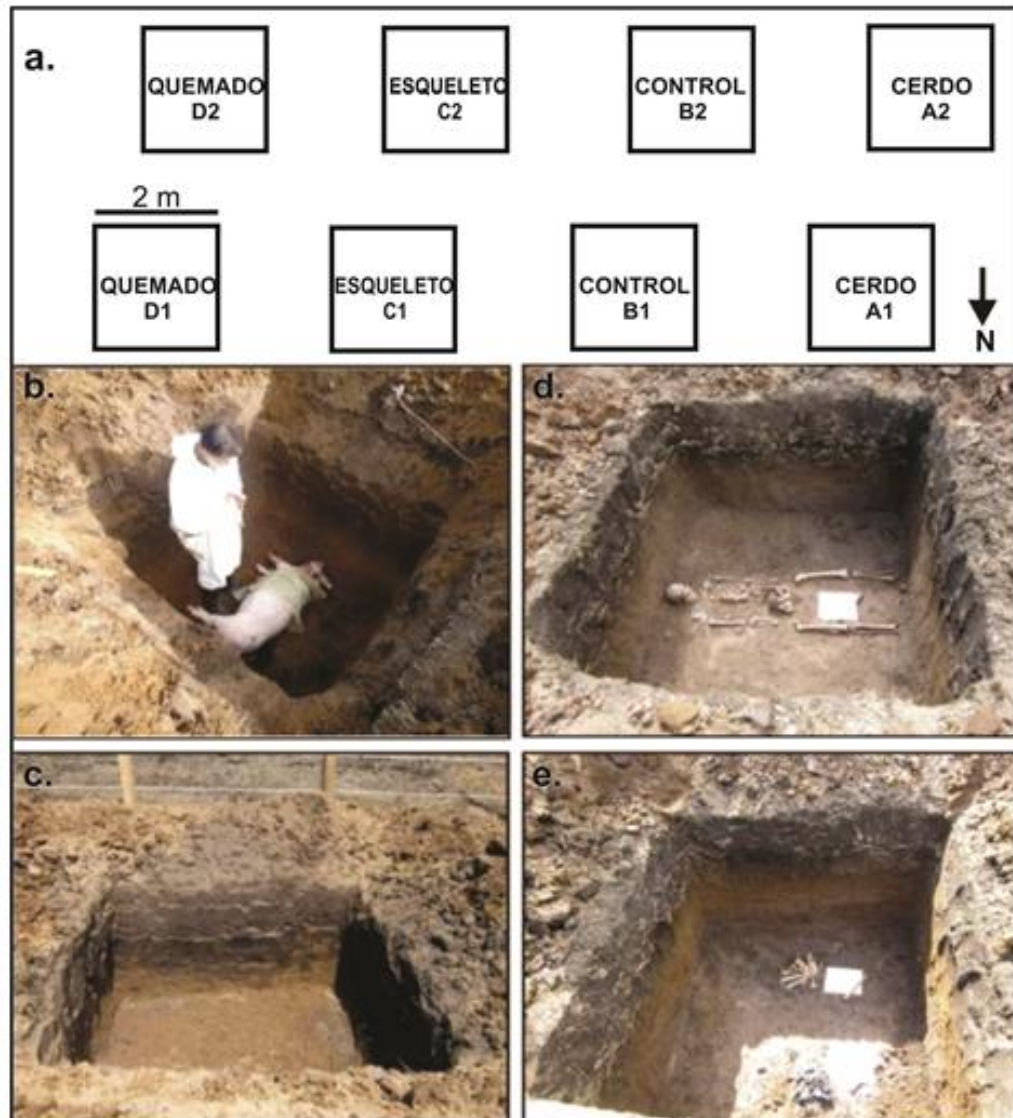
#### **3.3.1 Simulación de ocho fosas clandestinas en el Centro Agropecuario Marengo**

Se decidió utilizar cadáveres de cerdos domésticos frescos para simular fosas clandestinas de víctimas de asesinato, ya que han sido utilizados de forma común en este tipo de experimentos de seguimiento (Schultz, 2006; Pringle *et al.*, 2008; Schultz, 2008; Jervis & Pringle, 2009; Juerges, *et al.*, 2010; Schultz & Martin, 2011; Pringle *et al.*, 2012b; Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012c; Ruffell *et al.*, 2014), que comprenden composición química similar, tamaño corporal, tejido del cuerpo, proporciones de grasa y tipos de piel y pelo de los seres humanos (Carter & Tibbett, 2009), lo que semeja el proceso de descomposición del cuerpo humano.

También fue posible utilizar restos óseos humanos en esta investigación para representar tumbas clandestinas encontradas después de un lapso suficiente para que los cuerpos sepultados se conviertan en esqueletos. Las condiciones en las cuales sucede este proceso suelen abarcar meses o años después del entierro, de acuerdo con el clima local, el tipo de suelo y variables descritas en otras partes (Pringle *et al.*, 2012a). De igual forma, fue posible representar las circunstancias donde los restos óseos han sido quemados o decapitados (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2015).

El 19 de junio de 2013, en un área de 7 por 17 metros se simularon las condiciones de cuerpos inhumados y objetos enterrados en ocho fosas con dimensiones de 2 metros de ancho por 2 metros de largo, en un patrón regular (figura 3-3) como otros investigadores han llevado a cabo (Schultz, 2008; Jervis & Pringle, 2009; Juerges, *et al.*, 2010; Schultz & Martin, 2011; Pringle *et al.*, 2012b; Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012c). Cuatro tumbas fueron excavadas a 0,8 metros de profundidad y las otras cuatro a 1,2 metros, a diferencia de las reportadas en Estados Unidos (Manhein, 1996) y el Reino Unido (Hunter, 2005) que han sido a 0,5 metros.

**Figura 3-3:** Fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, municipio de Mosquera: **a.** Vista de planta de las ocho fosas clandestinas simuladas, con profundidades de 0,8 y 1,2 metros en la parte de abajo y arriba, respectivamente; **b.** Con cerdo; **c.** De control; **d.** Esqueleto humano; **e.** Huesos incinerados y con la simulación de un decapitado.



En dos fosas simuladas (A1 y A2) se colocaron cerdos adultos de ~ 70 kilos, que fueron electrocutados y luego desangrados por el cuello 6 horas antes del entierro; la mitad inferior del cuerpo de cada uno fue envuelta con tela para representar un escenario común de entierro en Colombia (Fiscalía General de la Nación, 2015). Otras dos tumbas (B1 y B2) se dejaron vacías como control; en las siguientes dos (C1 y C2) se colocaron esqueletos en posición decúbito dorsal

extendido, y en la segunda de ellas se pusieron, de forma aleatoria, alrededor de las costillas, clavícula y húmero, 6 vainillas calibre 9 milímetros y 4 vainillas calibre 38 milímetros, que corresponden a las armas usuales para homicidios por armas de fuego en Colombia. Las dos fosas finales contenían restos óseos que simulaban personas decapitadas y quemadas (tabla 3-1). Todas las tumbas fueron rellenadas otra vez con el material excavado al nivel del suelo.

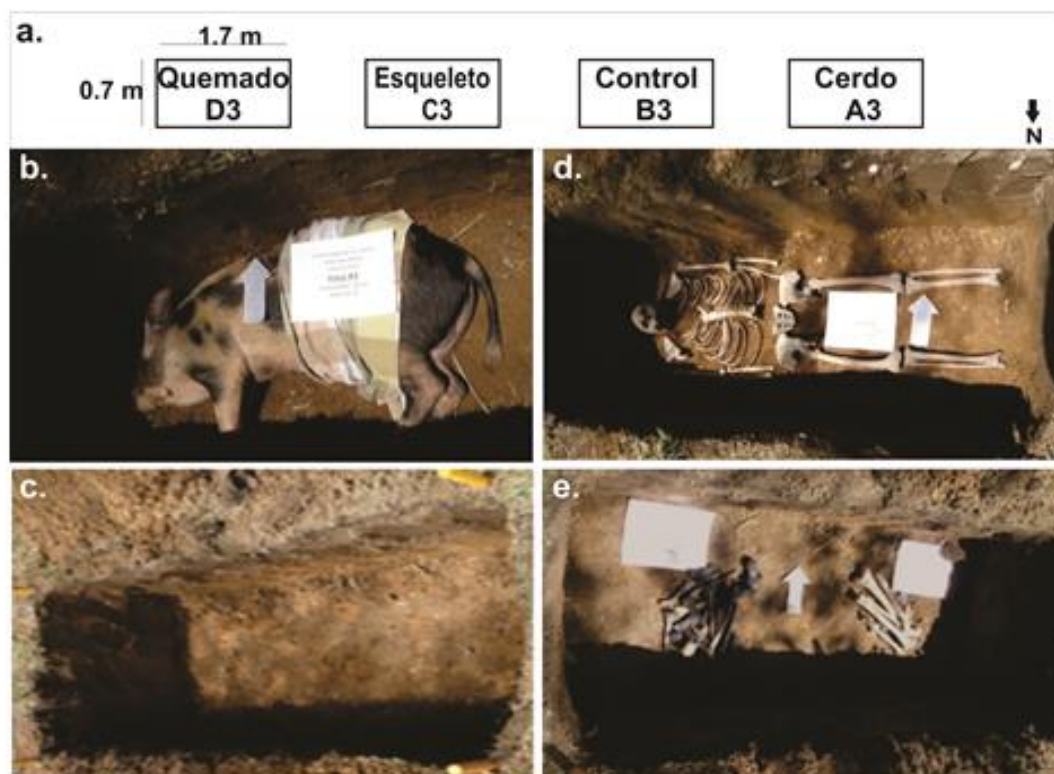
**Tabla 3-1:** Detalles de las ocho fosas simuladas con dimensiones, contenido y justificación. Las denominadas A1-D1 fueron cavadas a ~ 0,8 metros y las A2-D2 a ~ 1,2 metros de profundidad, respectivamente.

Lugar	Fosa	Dimensiones	Contenido	Descripción	Justificación
<b>Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera, sabana de Bogotá</b>	A1/A2	2 m x 2 m x 0,8 m / 1,2 m	Cerdo doméstico fresco de 70 kg	Mitad inferior envuelta en tela	Representa un escenario común, con medio cuerpo cubierto
	B1/B2	2 m x 2 m x 0,8 m / 1,2 m	Vacía	Se cavo y volvió a llenar	Fosa control
	C1/C2	2 m x 2 m x 0,8 m / 1,2 m	Esqueleto humano con 6 vainillas de 9 mm y 4 de 38 mm	Esqueleto en posición decúbito dorsal	Escenario común de homicidio sin prendas
	D1/D2	2 m x 2 m x 0,8 m / 1,2 m	Restos óseos incinerados y con la simulación de un decapitado	Huesos quemados separados de los que simulan un decapitado	Escenario común de homicidio

### 3.3.2 Simulación de cuatro fosas clandestinas en la Granja Experimental Barcelona

El 23 de octubre de 2014, en un área de 2 por 11 metros se simulon las condiciones de cuerpos inhumados y objetos enterrados en cuatro fosas con dimensiones de 1,7 metros de largo por 0,7 metros de ancho en un patrón regular (figura 3-4) en condiciones parecidas a las que otros investigadores han llevado a cabo (Schultz, 2008; Jarvis & Pringle, 2009; Juerges, *et al.*, 2010; Schultz & Martin, 2011; Pringle *et al.*, 2012b; Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012c). Todas las tumbas fueron cavadas a ~ 0,5 metros, que es el promedio de la profundidad más común encontrada en las fosas clandestinas descubiertas en Colombia (William Romero, comunicación personal, 2014).

**Figura 3-4:** Fosas simuladas en Granja Experimental Barcelona, Villavicencio. **a.** Vista de planta de las cuatro fosas clandestinas simuladas a una profundidad de 0,50 metros; **b.** Con cerdo; **c.** De control; **d.** Esqueleto humano; **e.** Huesos incinerados y no incinerados.



En una fosa simulada (A3) se colocó un cerdo adulto de ~ 70 kilos que fue muerto con 20 centímetros de Stresnil y 2 centímetros de Valium intramuscular en la tabla del cuello y luego desangrado en el estómago una hora antes del entierro; se envolvió con tela la mitad inferior del cuerpo para representar un escenario común de entierro en Colombia (Fiscalía General de la Nación, 2015). Una segunda tumba (B3) se dejó vacía como control; en la siguiente (C3) se puso un esqueleto en posición decúbito dorsal extendido, y la última (D3) contenía restos óseos que representaban un decapitado e incinerado (tabla 3-2). Todas las tumbas fueron rellenadas otra vez con el material excavado al nivel del suelo.

**Tabla 3-2:** Detalles de las cuatro fosas simuladas con dimensiones, contenido y justificación. Todas las fosas fueron hechas a ~ 0,5 metros de profundidad.

Lugar	Fosa	Dimensiones	Contenido	Descripción	Justificación
<b>Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio, Meta</b>	A3	1,7 m x 0,7 m x 0,5 m	Cerdo doméstico fresco de 70 kg	Mitad inferior envuelta en tela	Representa un escenario común, con medio cuerpo cubierto
	B3	1,7 m x 0,7 m x 0,5 m	Vacía	Se cavó y volvió a llenar	Fosa control
	C3	1,7 m x 0,7 m x 0,5 m	Esqueleto humano	Esqueleto en posición decúbito dorsal	Escenario común de homicidio sin prendas
	D3	1,7 m x 0,7 m x 0,5 m	Restos óseos incinerados y con la simulación de un decapitado	Huesos quemados separados de los que simulan un decapitado	Escenario común de homicidio



### 3.4 Consideraciones bioéticas

Debido a que se requería el uso de animales y restos óseos humanos para el presente proyecto, es pertinente mencionar la normatividad bioética que regula los procedimientos con fines de experimentación e investigación, la cual fue cumplida a cabalidad en esta investigación.

- La Ley 84 del 27 de diciembre de 1989, del Congreso Nacional de la República de Colombia, establece el Estatuto Nacional de Protección de los Animales, en su capítulo VI, donde se habla sobre el “uso de animales vivos en experimentos e investigación”, y manifiesta que estos seres vivos solo deberán usarse para el avance de la ciencia (Congreso Nacional, 1989).
- La Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud, donde se habla de la “investigación biomédica con animales”, manifiesta que se debe cumplir de forma estricta con la ley anterior, y además, en su Título V, que la eutanasia de los animales se efectuará con anestésicos apropiados, aprobados por la asociación veterinaria y mediante un procedimiento que deberá ser realizado por personal con calificación apropiada o experiencia. También, que solo se emplearán animales adquiridos de forma legal y se mantendrán en condiciones adecuadas y que cumplan con las reglamentaciones sanitarias vigentes (Ministerio de Salud, 1993).

La misma Resolución 8430 en su Capítulo VI, “De la investigación en órganos, tejidos y sus derivados, productos y cadáveres de seres humanos”, Artículo 48, sobre el respeto al cadáver humano, también establece lo referente al concepto de dignidad humana. Para cumplir con tales normas, se informa que los restos óseos usados en el desarrollo de este proyecto fueron donados por la Asociación Colombiana de Antropología Forense (ACAF) y no están relacionados con ningún proceso penal o civil, como consta en el oficio 031-12 ACAF, con fecha 28 de mayo de 2012.

Para complementar lo anterior, también se tuvo presente la teoría sobre el Principio de las tres erres, de Russel y Burch: reemplazo, que se refiere al uso de animales no conscientes; reducción, en donde si la investigación amerita gran cantidad de animales, debe intentarse disminuir su número sin permitir que afecte la trazabilidad de los resultados, y refinamiento, para minimizar el dolor y la incomodidad (Mrad de Osorio, 2006).

## **3.5 Muestreo y adquisición de datos**

Se recolectaron muestras de suelos y vegetación, así como datos de pluviosidad y temperatura con el objetivo de evaluar estas variables en la interpretación de los datos geofísicos que también fueron tomados en los dos laboratorios experimentales con los equipos GPR, Profiler 400 y Abem Terrameter 1000. Todo lo anterior se detalla a continuación.

### **3.5.1 Suelos**

Para el muestreo de suelos se definió el perfil de cada fosa y con un palustre de acero inoxidable se procedió a recolectar la cantidad de ~ 500 gramos de cada estrato, en una bolsa plástica sellada y rotulada de forma correcta; luego se llevó al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

#### ***3.5.1.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera***

Se recolectaron cuatro muestras de suelo de cada fosa, tres de cada uno de los horizontes que se identificaron y una del piso. La excepción fue la fosa B1, donde la muestra del piso se contaminó, y la fosa C2, donde no se observó el horizonte 1. En total se recolectaron 30 muestras para el análisis de la textura, retención de humedad y composición elemental.

#### ***3.5.1.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio***

Se recolectaron dos muestras de suelo de cada fosa, una del único horizonte presente de 0 a 50 centímetros, y una del piso, es decir, en total se recolectaron ocho muestras para el análisis de la textura, retención de humedad y composición elemental.

### **3.5.2 Vegetación**

Se hizo el seguimiento al comportamiento de la vegetación que aparecía en los dos laboratorios experimentales durante el periodo de estudio y se utilizó el protocolo del Herbario Nacional de la Universidad Nacional de Colombia (1980) para la recolección de las plantas en la medida en que estas crecían en el área delimitada para la investigación.

### 3.5.2.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera

Se recolectaron las plantas (hojas con tallos y flores) y pastos que crecieron sobre las fosas y entre ellas durante los primeros cuatro meses, con el fin de identificarlas y determinar si hubo o no relación con respecto a los sitios donde se simularon las fosas clandestinas

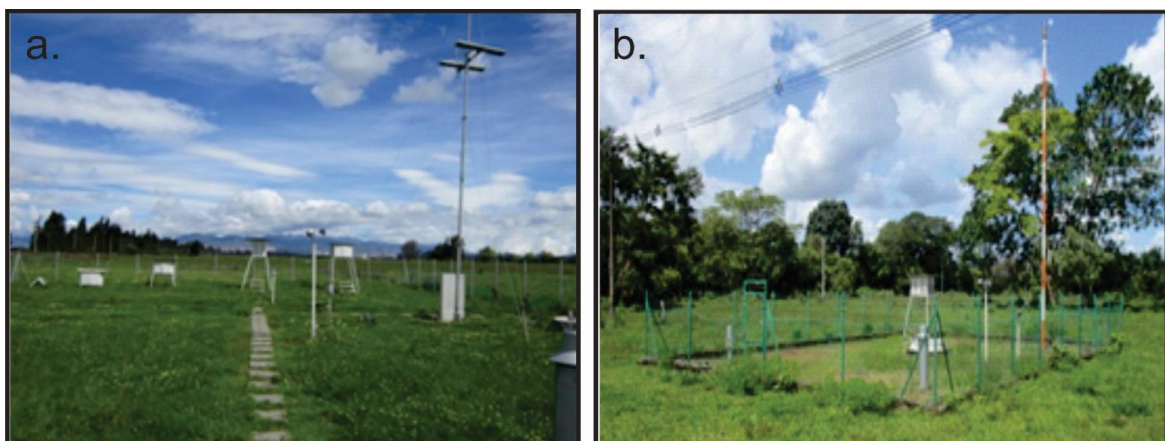
### 3.5.2.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio

Se siguió el procedimiento mencionado en el numeral 3.5.2.1, con excepción del tiempo de recolección de los pastos y plantas, que fue después de los primeros cuatro meses, ya que antes no hubo crecimiento.

## 3.5.3 Pluviosidad y temperatura

Se recolectó la información diaria de pluviosidad y temperatura de dos estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), la primera ubicada en el Centro de Investigación Agropecuaria de Tibaitatá, en el municipio de Mosquera (figura 3-5a), a una distancia aproximada de ~ 1 kilómetro del sitio del experimento en la sabana de Bogotá, y la segunda localizada en la Universidad de los Llanos, Sede Barcelona (figura 3-5b), en el municipio de Villavicencio a ~ 0,5 kilómetros del lugar del experimento en los Llanos Orientales. La estación toma los datos durante las 24 horas todos los días, de tal forma que se tiene un registro permanente y confiable de las variaciones de estos factores climáticos.

**Figura 3-5:** Estaciones meteorológicas del Ideam. **a.** Centro de Investigación Agropecuario de Tibaitatá, Mosquera. **b.** Granja Experimental Barcelona, Villavicencio.



### 3.5.4 Métodos geofísicos

Se realizó el monitoreo geofísico de las 12 fosas simuladas en los dos laboratorios experimentales, donde se utilizó un georradar, un equipo de electromagnetismo y uno de resistividad eléctrica; sus especificaciones técnicas aparecen en el Anexo A. El proceso estuvo acompañado de la observación detallada del lugar, la toma de fotografías, el registro en la libreta de campo y la recolección de muestras de vegetación cuando aplicaba.

#### 3.5.4.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera

Se realizaron 26 salidas de campo en las cuales se hizo el monitoreo a las ocho fosas simuladas con GPR, inducción electromagnética y resistividad eléctrica, de acuerdo con la disponibilidad de los equipos. Se reporta la fecha de toma de datos con los días después del entierro y la temperatura acumulada (tabla 3-3); estos últimos dos datos para indicar que se deben tener en cuenta en futuros estudios relacionados con la determinación del tiempo *post mortem*, es decir, para establecer el lapso desde que una persona es inhumada hasta que se encuentra, de ahí la importancia de conocer la temperatura acumulada, por cuanto está relacionada con la aparición de los insectos en el proceso de descomposición del cuerpo, que a través de la entomología permitirá determinar una fecha aproximada del deceso. Los datos de la temperatura acumulada (tabla 3-3), corresponden a la suma de los promedios en grados Celsius que reporta la estación meteorológica cada día. La información anterior es importante como referencia para grupos forenses internacionales e investigaciones futuras en Colombia.

**Tabla 3-3:** Resumen de la toma de datos en el Centro Agropecuario Marengo durante el periodo de estudio. Se incluye el promedio diario acumulado de temperatura. La fecha de enterramiento fue el 19 de junio de 2013.

Salida de campo	Fecha toma de datos	Días después del entierro	Temperatura acumulada
1	20/06/2013	1	22
2	03/07/2013	14	210
3	09/07/2013	20	303
4	15/07/2013	27	382
5	26/09/2013	100	1.303

**Tabla 3-3:** (Continuación)

<b>Salida de campo</b>	<b>Fecha toma de datos</b>	<b>Días después del entierro</b>	<b>Temperatura acumulada</b>
6	23/10/2013	127	1.683
7	14/11/2013	149	1.953
8	28/01/2014	224	3.002
9	06/03/2014	261	3.510
10	08/04/2014	294	3.951,1
11	14/05/2014	323	4.320,3
12	14/06/2014	351	4.661,9
13	20/06/2014	367	4.853,9
14	02/07/2014	379	4.995,7
15	10/07/2014	387	5.090,9
16	04/08/2014	412	5.373,9
17	01/09/2014	440	5.751,5
18	24/09/2014	463	6.074,5
19	08/10/2014	477	6.277,7
20	18/11/2014	518	6.767,9
21	16/12/2014	546	7.134,9
22	16/01/2015	577	7.674,1
23	12/02/2015	604	8.003,9
24	13/03/2015	633	8.430,7
25	10/04/2015	661	8.754,3
26	11/06/2015	723	9.472,2

#### **3.5.4.1.1 GPR**

Se utilizó un georradar modelo Mala ProEx, que fue calibrado para la señal y el odómetro; en la primera se tuvieron en cuenta las frecuencias 250 y 500 MHz, la ventana de tiempo de 30 ns, y una velocidad de 185 m/μS, esta es equivalente a la constante dieléctrica de acuerdo a la tabla de referencia para el tipo de material, en este caso, la textura superficial en el perfil del suelo; de igual forma, la toma horizontal de datos se programó cada 0,02 metros. En el segundo aspecto se hizo un recorrido de 5 metros a partir de un eje de la llanta. Luego se tomaron los datos en una malla de 17 por 7 metros, con distancias de 0,25 m en sentido norte-sur y este-oeste. Se utilizó una antena de

frecuencia 250 MHz desde junio de 2013 hasta marzo de 2014; a partir de abril y hasta septiembre del mismo año también se empleó una antena de 500 MHz y la toma se realizó norte-sur y oeste-este.

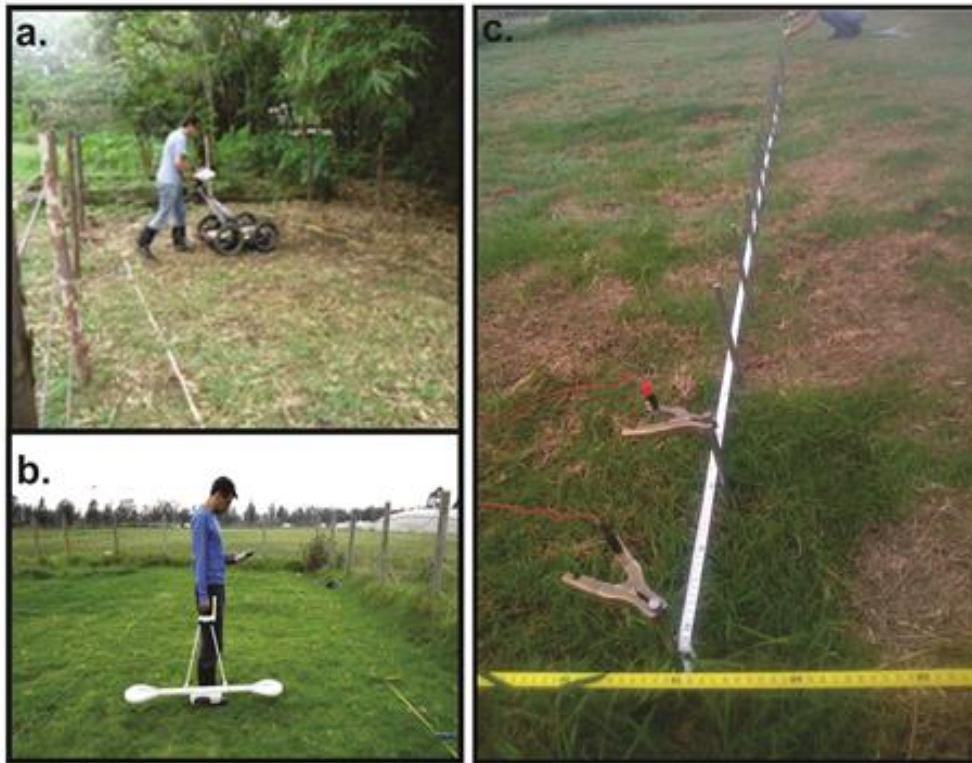
Cada uno de los perfiles adquiridos por medio del GPR fueron mediciones continuas, lo cual suministra un conjunto de datos de todo el recorrido en cada una de ellas; estos son recolectados y almacenados en la unidad de adquisición del georradar, luego se pasan a una memoria USB y de allí se copian al computador en el cual se encuentra instalado el *software* RadExplorer (DECO, 2005), que se ejecuta con Windows XP; por medio de este se realiza el procesado y filtrado de los perfiles. Los archivos que se generan durante la adquisición son de cinco extensiones diferentes, a saber: \*.cor, \*.em, \*.mrk, \*.rd3 y \*.rad. El archivo \*.rd3 contiene los datos crudos del radargrama y el archivo \*.rad es el encabezado del radargrama, el cual le permite al *software* leer y mostrar el perfil; luego, cada uno de estos se procesa por medio de un conjunto de filtros que es llamado un flujo de procesamiento; para determinar cuáles filtros utilizar, se debe tener en cuenta cual es el objeto que se pretende buscar, luego se empiezan a ensayar para ver los cambios sobre los perfiles y así detectar rasgos que se orientan hacia el elemento de interés, en el perfil de dos dimensiones, 2D. Una vez se han seleccionado los filtros, se procede a aplicarlos en cada uno de los perfiles tomados sobre el terreno y se obtienen seis archivos con extensiones \*.mrk, \*.rad, \*.rad.vm, \*.rd3, \*.rep y \*.utm.

Para cada perfil se llevaron a cabo etapas de procesado secuenciales estándar como en Molina *et al.*, (2015); para optimizar la calidad de la imagen se utilizaron filtros, a saber: (i) la eliminación de DC-Removal debido a la saturación que trae la señal de las ondas de aire y terrestre (Neves *et al.*, 1996); (ii) la corrección del origen del tiempo (tiempo *zero*) para hacer todo rastro consistente a partir de la primera reflexión significativa que llega a la antena receptora y es debida a la interfaz suelo-aire que se toma como referencia (Gómez, 2008); (iii) filtrado espacial 2D, utilizado para hacer un análisis de velocidad de la onda y convertir el eje vertical en profundidad de acuerdo con la constante dieléctrica (Allred *et al.*, 2008); (iv) el filtrado de paso de banda para reducir el ruido; (v) la corrección de amplitud para impulsar profundas amplitudes de reflexión, y (vi) deconvolución, usado para remover el efecto del origen de ondas pequeñas a partir del registro de los datos (Neves *et al.*, 1996).

Luego, para generar el modelo en tres dimensiones, se tuvo en cuenta la adquisición de datos realizada en forma de cuadrícula en el sentido X y Y, con separación entre perfiles de 0,25 metros.

Para esto se utilizó cada uno de los archivos generados con el flujo de procesamiento ya descrito; estos archivos fueron cargados en el *software* Radan (GSSI, 2012), luego se convirtieron y de acuerdo a las medidas de la cuadrícula se hizo un modelo para que cada uno de los archivos fuera colocado, y así hacer una inversión que arrojará un cubo 3D, en el cual se tiene una ubicación espacial de los posibles objetivos que se encuentren, ya que tenemos el largo, el ancho y la profundidad a la que se encuentra cada una de las anomalías que pueden representar los objetivos que se han enterrado en el sitio de estudio. De este modelo se tomó la vista superior del laboratorio experimental de la zona rural, donde se consideró necesario aplicarlo.

**Figura 3-6:** Adquisición de datos geofísicos: **a.** GPR; **b.** Susceptibilidad magnética y conductividad; **c.** Resistividad eléctrica.



#### 3.5.4.1.2 Susceptibilidad magnética y Conductividad

Se empleó el método Slingram, en el cual tanto el campo primario (bobina transmisora) como el secundario (bobina receptora) Tx-Rx fijo se mueven juntos en una separación constante (Reynolds, 2011; Thiesson *et al.*, 2011) para obtener de manera simultánea mediciones de susceptibilidad y conductividad con un equipo modelo Profiler GSSI 400 (figura 3-6b). En la literatura revisada no se encontraron reportes del uso de este equipo con fines forenses. El Profiler trabaja el método

electromagnético en el dominio de la frecuencia. La recolección de datos se inició en la semana 52 después de los entierros, debido a la no disponibilidad previa del equipo.

En una grilla de 7 por 17 metros a lo largo de una secuencia de líneas paralelas norte-sur separadas 0,50 metros, con intervalos también de 0,50 metros y tiempo de un segundo a velocidad constante sobre cada línea, fueron adquiridos los datos con un equipo Profiler EMP 400 de marca GSSI (GSSI, 2006), que recoge la información en una computadora personal digital (PDA), la cual se programó después de hacer ensayos con varios tipos de grillas, los dos momentos de orientaciones coplanar de los dipolos y un barrido de las 16 frecuencias que tiene el equipo, que van de 1.000 a 16.000 Hz. Después de las pruebas iniciales y la calibración del equipo con el uso de las mejores prácticas (Pringle *et al.*, 2012a, Harrison & Donnelly, 2009; Larson *et al.*, 2011, Reynolds, 2011), se escogió la grilla yLbz, momento dipolo vertical VDM (I) y frecuencias de 11.000, 13.000 y 15.000 Hz, esta última la de mejor resultado, motivo por el cual fue la seleccionada para los reportes. Antes de tomar los datos de estas tres frecuencias que el equipo permite adquirir de manera simultánea, se procedió a su respectiva calibración con las dos formas de las que dispone: en la primera, autocalibración, se coloca el equipo sobre el terreno, y en la segunda, el operador sostiene el Profiler, para lo cual se requiere medir los centímetros que separan el equipo del suelo y así incluir dicho dato en la PDA, la cual también tiene el *zero level* para corregir la deriva. Además, se tuvo en cuenta la importancia de quitar todos los objetos metálicos del cuerpo que pudieran generar interferencia durante la adquisición, la cual se realizó tres veces para comparar, ver repetibilidad y escoger los mejores perfiles.

Una vez se recogieron los datos en una PDA, se conecta a un computador a través de un cable USB que requiere tener Microsoft® ActiveSync o a través de la interfaz del administrador de archivos diseñada para el acceso a la memoria de almacenamiento del Profiler EMI 400 (GSSI, 2006) y se genera una carpeta común de extensión \*.prj. que contiene dos tipos de archivos: uno \*.dzb, que tiene los datos recolectados en modo discreto, y \*.EMI, que son los tomados en modo continuo y convertidos a un archivo de texto ASCII para ser abierto en Excel y reconocido por el *software* Geometrics MagMap 2000 (Geometrics, 2002), en el cual se pueden hacer los ploteos de las frecuencias en dos componentes: una real llamada *inphase* (en fase) que es la respuesta aproximada a la susceptibilidad magnética aparente del suelo, y una imaginaria denominada *quadratura*, que es la respuesta aproximada a la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEN/WS 059, 2011); ambas tienen como unidades de medida partes por millón (PPM). En dicho



*software* se utilizó el filtro estadístico *despike* para eliminar ruidos producto del operador o equipo y obtener mapas en 2D.

Los datos fueron exportados al *software* Surfer versión 8 (Golden Software, 2002), donde el archivo se grabó con extensión \*.txt para hacer la grilla con el método *kriging*. Luego se hizo el procesado a través del *software* Terrasurveyor versión 3.0.27.0 (DW Consulting, 2014), el cual permite leer múltiples tipos de archivos, de ahí que se importó la información de Surfer y se generó un archivo de extensión \*.grd y luego uno \*.xcp para poder visualizar el mapa, al cual se le aplicó el filtro estadístico *despike*, que permite analizar el conjunto de datos con el fin de eliminar valores fuera de la media y reemplazarlos por cualquiera de la media o umbral, y por último se utilizaron los parámetros propios del *software* para asignar colores, escala, líneas, contornos y formas.

#### **3.5.4.1.3 Resistividad eléctrica**

En la misma área de 7 por 17 metros se hicieron 10 mediciones de resistividad a lo largo de ocho líneas en dirección este-oeste, de las cuales cuatro separadas 0,50 metros entre sí atravesaban las fosas A1, B1, C1 y D1; otras cuatro separadas igual distancia cruzaron las fosas A2, B2, C2 y D2, mientras una adicional era de referencia al no pasar por ninguna fosa. Cada línea tenía 17 metros de largo, a través de la cual se movieron dos electrodos separados 0,25 metros y enterrados aproximadamente 0,10 metros; se utilizó un arreglo polo-polo, considerado el más apropiado para detectar variaciones horizontales (Pringle *et al.*, 2012, Schultz & Martin, 2012), donde a una distancia de ~ 15 metros del sitio de estudio se ubicaron los otros dos electrodos fijos y separados un metro entre sí, con el uso de la práctica estándar (Clark, 1996; Reynolds, 2011). Se utilizó un equipo de geoelectrica de marca Abem Terrameter (Abem, 2006) donde se tuvo presente durante la adquisición de los datos la desviación estándar de los mismos como referencia de calidad, así como la repetibilidad que se monitoreaba de forma aleatoria. Antes de usar el arreglo polo-polo se experimentó con el arreglo de Wenner, pero los resultados no fueron satisfactorios.

Los datos adquiridos en campo fueron registrados en una base de datos Excel con la respectiva identificación de los ejes X, Y y la resistividad correspondiente; luego se ingresaron al *software* Surfer versión 8, donde el archivo se grabó con extensión \*.txt para hacer la grilla con el método *kriging*. A continuación se hizo el procesado a través del *software* Terrasurveyor versión 3.0.27.0, el cual permite la lectura de múltiples tipos de archivos, de ahí que se importara la información de Surfer y se generara un archivo de extensión \*.grd y otro \*.xcp para poder visualizar el mapa, al cual se le aplicó el filtro estadístico *despike*, que permite analizar el conjunto de datos con el fin de

eliminar valores fuera de la media y reemplazarlos por cualquiera de la media o umbral, y por último se utilizaron los parámetros propios del *software* para asignar colores, escala, líneas, contornos y formas.

### 3.5.4.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio

Se realizaron 12 salidas de campo en las cuales se hizo el monitoreo geofísico a las cuatro fosas simuladas y se utilizó GPR, inducción electromagnética (EMI) y resistividad eléctrica, de acuerdo con la disponibilidad de los equipos. En la tabla 3-4 se reporta la fecha de toma de datos, y como información complementaria para futuros estudios del intervalo *post mortem* se relacionan los días después del entierro y la temperatura acumulada.

**Tabla 3-4:** Resumen de la toma de datos en la Granja Experimental Barcelona durante el periodo de estudio. Se incluye el promedio diario acumulado de temperatura. La fecha de enterramiento fue 23 de octubre de 2014.

Salida de campo	Fecha toma de datos	Días después del entierro	Temperatura acumulada
1	24/10/2014	1	26,9
2	19/11/2014	27	720,9
3	18/12/2014	56	1.441,9
4	14/01/2015	83	2.145,1
5	11/02/2015	111	2.877,4
6	11/03/2015	139	3.614,9
7	08/04/2015	167	4.361,2
8	13/05/2015	202	5.273,8
9	10/06/2015	230	5.990
10	09/07/2015	259	6.717,5
11	12/08/2015	293	7.563,6
12	10/09/2015	322	8.295,8

#### **3.5.4.2.1 GPR**

Se utilizó el mismo georradar modelo Mala ProEx con el cual se tomaron los datos en el Centro Agropecuario Marengo y con los mismos parámetros; la diferencia radicó en que se pudieron usar las dos antenas de frecuencias 250 MHz y 500 MHz en todas las mediciones realizadas durante el periodo de estudio, en el área de 2 por 11 metros en modo bidireccional norte-sur y oeste-este.

El procesado de la información también se hizo con el *software* RadExplorer y se utilizaron filtros ya descritos en 3.5.4.1.1; se modificó el orden de algunos y se aplicaron en la siguiente secuencia: (i) eliminación de DC *removal*; (ii) ajuste del tiempo *zero*; (iii) deconvolución; (iv) filtrado de paso de banda; (v) filtrado espacial 2D, y (vi) corrección de amplitud para impulsar profundas amplitudes de reflexión.

#### **3.5.4.2.2 Susceptibilidad magnética y Conductividad**

Se utilizó el mismo equipo Profiler 400 ya mencionado en 3.5.4.1.2; de igual manera, se procedió a obtener de forma simultánea las mediciones de susceptibilidad y conductividad, en este caso con intervalos mensuales durante un año después del entierro. El área fue de 2 por 11 metros, con trayectos sobre líneas paralelas norte-sur separadas cada 0,5 metros, con intervalos también de 0,5 metros y tiempo de un segundo a velocidad constante sobre cada línea. De igual forma, se escogió la componente vertical (VMD) y las frecuencias de 11.000 Hz, 13.000 Hz y 15.000 Hz., esta última la de mejor resultado. El procedimiento seguido para el procesado de los datos también fue similar al ya descrito para la zona rural en el Centro Agropecuario Marengo.

#### **3.5.4.2.3 Resistividad eléctrica**

El conjunto de datos fue adquirido en la misma área de 2 por 11 metros con el mismo equipo Geoelectric Abem Terrameter, condiciones mencionadas en 3.5.4.1.3 y el uso del estándar de buenas prácticas (Clark, 1996; Reynolds, 2011). La información se recolectó en dirección este-oeste a través de cuatro líneas paralelas de 11 metros de largo separadas entre ellas 0,5 metros y con intervalos de toma de datos cada 0,25 metros. Una vez se tuvo la tabla de datos, se procesó como se indicó en el numeral 3.5.4.1.3.

### **3.6 Conclusión**

Se logró implementar la metodología propuesta en los dos laboratorios experimentales a través de los restos óseos y elementos colocados como objetivos en las fosas, acordes con los escenarios

reales donde las víctimas han sido encontradas. El diseño de la malla de 0,25 metros en el caso del georradar, las distancias entre electrodos también de 0,25 metros para resistividad, así como de 0,50 metros para susceptibilidad y conductividad, son consistentes con los estándares para la búsqueda de fosas clandestinas. El monitoreo del experimento se pudo desarrollar en el tiempo propuesto y se garantizó la utilización de equipos y programas de geofísica especializados, de alta resolución y con un buen funcionamiento.

Se logró documentar información adicional de meteorología, suelos y vegetación, de gran utilidad en la interpretación de resultados, por cuanto son variables que se deben tener en cuenta en el contexto de una prospección de geofísica forense para la toma de decisiones. Las variables mencionadas y las condiciones de medio ambiente entre los dos laboratorios experimentales dieron como resultado diferencias que se mostrarán en el próximo capítulo.

# Capítulo 4

## 4. Resultados

Se presenta el conjunto de resultados obtenidos a partir de la metodología expuesta en el capítulo 3, tanto de las variables suelos, vegetación, pluviosidad y temperatura, como de las respuestas dadas por las fosas a la aplicación de los métodos geofísicos en los dos laboratorios experimentales, por lo cual se mostrarán los resultados cuantitativos cuando apliquen, y cualitativos, plasmados en todo el desarrollo del capítulo, pero también se elaboró un resumen consolidado que tuvo en cuenta si hubo o no anomalías sobre las fosas durante cada uno de los monitoreos llevados a cabo. Por último, aparecerá de forma esquemática un comparativo de modelos de fosas.

### 4.1 Introducción

Conocer el comportamiento de las variables ambientales a las que están expuestas las fosas es un factor importante durante la prospección geofísica, por cuanto se requiere una visión de contexto para tener mayor probabilidad de éxito en la búsqueda. Por ello, en los siguientes numerales se ilustran, en primera instancia, los factores que podrían tener incidencia en el comportamiento de los resultados geofísicos, como lo son suelos, vegetación, pluviosidad y temperatura, y luego las respuestas obtenidas con los equipos GPR, Profiler 400 y Abem Terrameter.

## 4.2 Suelos

Se determinaron dos de las principales propiedades del suelo que tienen relación directa con la aplicación de métodos geofísicos, tales como la textura y la humedad; esto se llevó a cabo en todas las muestras de suelo recolectados y sus resultados se muestran a continuación.

### 4.2.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera

La tierra excavada de las fosas clandestinas fue analizada de acuerdo con los procedimientos estándar (IGAC, 2006), y los resultados de las texturas de las muestras de suelos (tabla 4-1), muestran que esta es franco arcillosa (FAr) para el horizonte 1 de las cuatro fosas que fueron construidas a una profundidad de 0,80 metros, mientras que hay variación en el mismo estrato entre franco arcillosa (FAr), franco limosa (FL) y franco arcillosa limosa (FArL) en las cuatro fosas cavadas a 1,20 metros. El horizonte 2 también tuvo diferencias entre las fosas menos y más profundas, con excepción de las que contenían huesos quemados y simulaban decapitados (D1) y (D2), en las cuales la textura fue la misma franco arcillosa limosa (FArL). El horizonte 3 en todas las fosas fue franco limoso (FL), con excepción de la que contenía el cerdo (A1).

Con respecto al grado de humedad del suelo se encontró una variación en los horizontes superiores entre 0,426 y 0,476, con promedio de 0,438. Estos valores de humedad del suelo fueron casi el doble de los reportados por otros autores en ambientes de climas templados (Jervis, 2009). La retención de humedad aumentó con la profundidad en los horizontes presentes en las fosas, excepto las denominadas D1 y D2, donde en el estrato 2 de cada una de ellas la retención de humedad fue mayor que en el horizonte 1, sin que la diferencia fuera significativa (tabla 4-1).

**Tabla 4-1:** Textura y retención de humedad de las muestras de suelos recolectadas de las fosas simuladas en Marengo, Mosquera. Convenciones: FAr: Franco arcilloso. FL: Franco limoso. FArL: Franco arcilloso limoso.

Fosa	Horizonte	Clase Textural	Retencion de Humedad	Fosa	Horizonte	Clase Textural	Retencion de Humedad
A1	1	FAr	43,67	A2	1	FAr	45,02
	2	FL	64,18		2	FAr	46,33
	3	FL	71,91		3	FAr	78,88
	Piso	FL	70,81		Piso	FL	71,68
B1	1	FAr	43,35	B2	1	FL	42,62
	2	FL	59,20		2	FAr	45,48
	3	FL	65,81		3	FL	56,12
	Piso	sd	sd		Piso	FL	53,38
C1	1	FAr	42,27	C2	1	sd	sd
	2	FAr	44,15		2	FArL	39,74
	3	FL	62,48		3	FL	53,04
	Piso	FL	65,31		Piso	FAr	48,38
D1	1	FAr	43,08	D2	1	FArL	47,61
	2	FArL	42,58		2	FArL	45,53
	3	FL	70,43		3	FL	55,81
	Piso	FL	69,46		Piso	FArL	49,29

### 4.2.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio

Se realizó el mismo procedimiento señalado en 4.2.1 y los resultados de las texturas de las muestras de suelos (tabla 4-2) muestran que esta es franco arcillosa (FAr) para el único horizonte presente en tres fosas, y arcillosa (Ar) en la que contiene el cerdo (A3), mientras que el piso es homogéneo para los 4 sitios cavados.

En relación con el contenido de humedad del suelo hubo variaciones en el único horizonte detectado entre 0,523 y 0,666, con promedio de 0,585. Para estos valores también aplica lo reportado en el numeral anterior respecto a otros estudios en clima templado. La retención de humedad con la profundidad tuvo un comportamiento diferente, ya que mientras en la fosa A3 fue constante, en la B3 aumentó y en las C3 y D3 disminuyó (tabla 4-2).

**Tabla 4-2:** Textura y retención de humedad de las muestras de suelos recolectadas de las fosas simuladas en Granja Experimental Barcelona, Villavicencio. Convenciones: Ar: arcilloso. FAr: Franco arcilloso.

Fosas	Horizonte	Clase textural	Retención de humedad
A3	1	Ar	52,35
	Piso	Ar	52,48
B3	1	FAr	55,72
	Piso	Ar	60,09
C3	1	FAr	66,58
	Piso	Ar	53,74
D3	1	FAr	59,67
	Piso	Ar	54,18

### 4.3 Vegetación

El seguimiento al comportamiento de la vegetación fue un trabajo adicional que se hizo dentro de la investigación, ya que no forma parte de los objetivos, pero se consideró importante tenerlo presente en el momento de iniciar el monitoreo en los laboratorios experimentales, por cuanto forma parte integral de los aspectos a tener en cuenta en una primera prospección visual del terreno; por eso aparecen los resultados relacionados con el crecimiento y desarrollo durante el periodo de estudio.

#### 4.3.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera

Después de cuatro semanas de entierro se observó sobre la superficie el crecimiento de pasto kikuyo, que predominó entre las fosas clandestinas simuladas (figura 4-1a). Después de ocho semanas de entierro, la familia *Brassicaceae* (rábano silvestre) predominó sobre las fosas (figura 4-1b). Luego de 16 semanas de entierro se apreció un exuberante *Raphanus raphanistrum* sobre todas las tumbas (figura 4-1c) con pasto kikuyo entre ellas (figura 4-1d).



**Figura 4-1:** Secuencias del crecimiento de la vegetación en el Centro Agropecuario Marengo. **a.** Semana 6, delimitación de las fosas menos profundas; **b.** Semana 8, plantas sobre fosas y pasto separándolas; **c.** Semana 15, rábano silvestre en gran parte del área de estudio; **d.** Semana 15, pasto kikuyo en medio de las fosas.



La observación realizada sobre el área de estudio a partir del inicio del experimento mostró que en la semana 6 el pasto comenzó a delimitar las cuatro fosas menos profundas, mientras que en las de mayor profundidad no sucedió lo mismo (figura 4-1a). En la semana 8 todo el costado derecho se ve con dos tipos de vegetación: una que corresponde al pasto que continuó en crecimiento alrededor de las fosas, y la otra, las plantas que están sobre las fosas de la izquierda; en contraste, en el lado derecho es muy leve el crecimiento de solo pasto en algunos sectores aislados y no se observaron plantas (figura 4-1b). En la semana 15 ya hay un crecimiento considerable de la planta *Raphanus raphanistrum L.* que pertenece a la familia *Brassicaceae* (figura 4-1c); sin embargo, se mantiene la presencia de pasto kikuyo en medio de las fosas y marca de esta forma diferencia entre los dos tipos de vegetación (figura 4-1d).

### 4.3.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio

Se observó que el pasto *Brachiaria decumbens* comenzó a delimitar las fosas después de cinco semanas (figura 4-2a); sin embargo, solo después de la semana 17 se aprecia de forma evidente su crecimiento (figura 4-2b), y en la semana 34 es clara la presencia de plantas de la familia *Malvaceae* y especies *Petiveria alliacea* sobre todas las fosas (figura 4-2c). La vegetación descrita es común en esos ambientes de bosque tropical (figura 4-2).

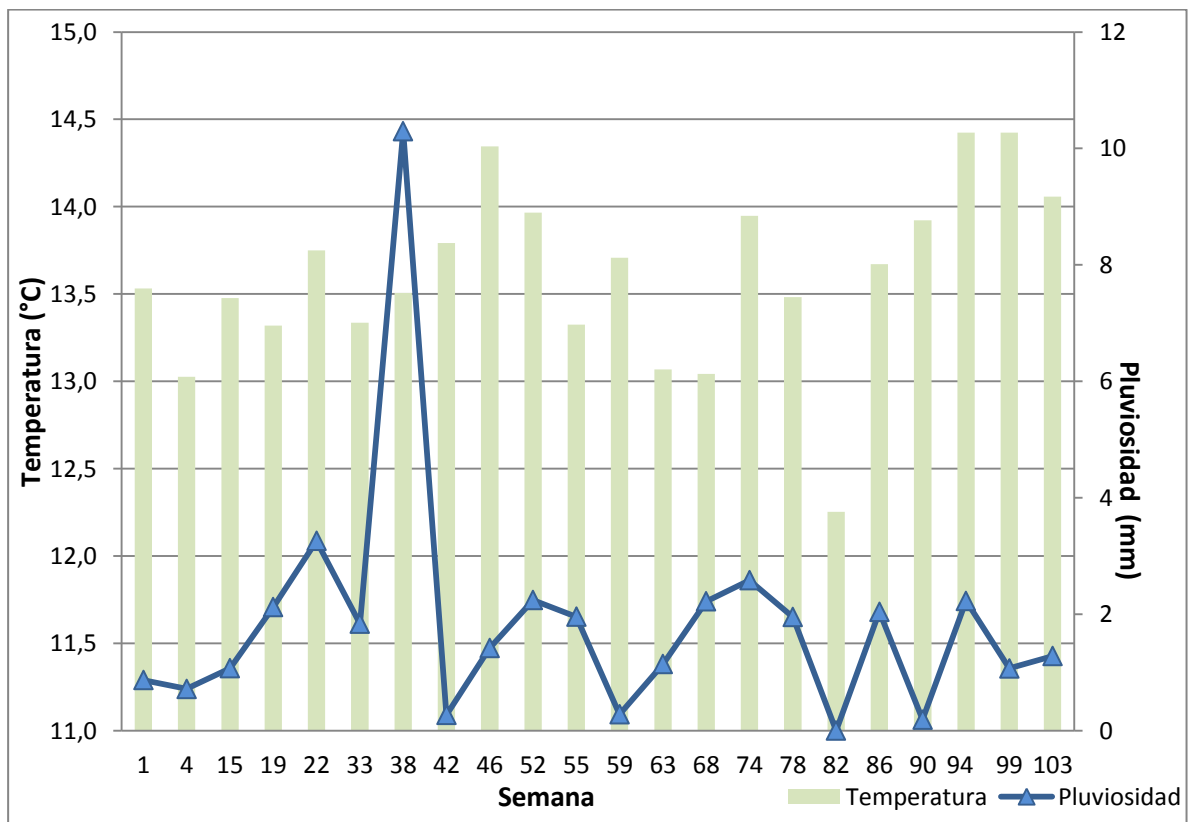
**Figura 4-2:** Secuencias del crecimiento de la vegetación en la Granja Experimental Barcelona. **a.** Cinco semanas después del enterramiento no hay vegetación sobre las fosas; **b.** En la semana 17 comienza el pasto *Brachiaria decumbens* a crecer entre las fosas y sobre parte de ellas; **c.** En la semana 34 se observan las especies *Malvaceae* y *Petiveria alliacea*, que crecieron sobre las fosas simuladas.



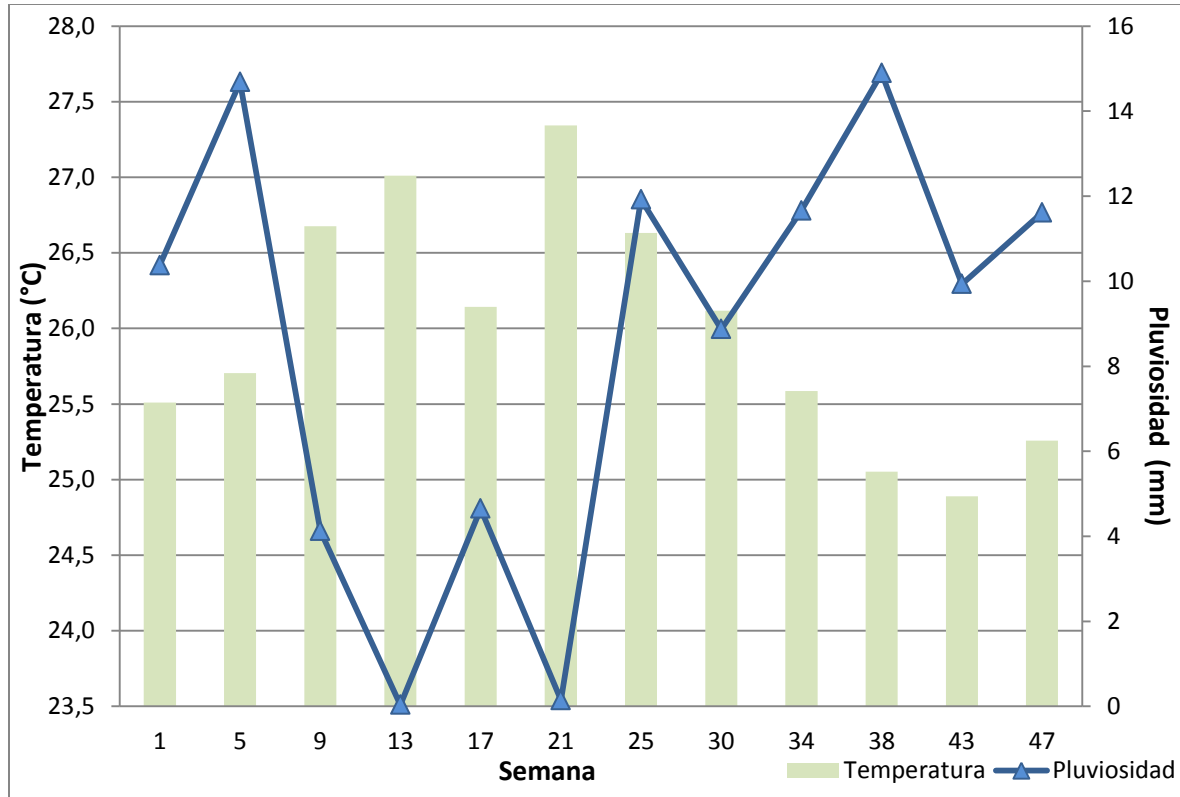
### 4.4 Pluviosidad y temperatura

Los datos de pluviosidad y temperatura son variables que cambian las propiedades físicas del suelo y, por lo tanto, son necesarias para la interpretación de los resultados que se obtengan con la información geofísica recolectada y procesada en campo. Se reportan los promedios mensuales de la pluviosidad y temperatura desde junio de 2013 hasta junio de 2015, que corresponden al periodo de estudio de la semana 1 a la 103 en el Centro Agropecuario Marengo, municipio de Mosquera (figura 4-3), y desde octubre de 2014 hasta septiembre de 2015, cuyo monitoreo se realizó desde la semana 1 hasta la 47 en la Granja Experimental Barcelona, municipio de Villavicencio (figura 4-4).

**Figura 4-3:** Datos promedio mensuales de pluviosidad y temperatura de la estación meteorológica del Centro de Investigación Corpoica-Ideam, ubicada a ~ 1 kilómetro del Centro Agropecuario Marengo.



**Figura 4-4:** Datos promedio mensuales de pluviosidad y temperatura de la estación meteorológica Unillanos-Ideam, ubicada a ~ 0,5 kilómetros de la Granja Experimental Barcelona.



## 4.5 Métodos geofísicos

Se utilizaron cuatro métodos geofísicos, utilizados en experimentos similares, tal como se reseñó en la revisión de literatura del capítulo 2 y se hizo alusión en algunos apartes del capítulo 3; sin embargo, debido a los diferentes resultados obtenidos por otros investigadores de acuerdo con las variables y ambientes en que hicieron sus trabajos, fue necesario ensayarlos en las condiciones en que se requieren, tanto en Colombia como en otros países de la zona intertropical.

Los resultados de los métodos geofísicos de alta resolución empleados en los dos laboratorios experimentales y que se detallan en los siguientes numerales fueron georradar, susceptibilidad magnética, conductividad y resistividad eléctrica.

### 4.5.1 GPR

Es el equipo más común que ha sido utilizado en experimentos de geofísica forense por sus buenos resultados en la mayoría de casos, de ahí la importancia de ensayarlo en el diseño experimental descrito en el numeral 3.3. Los resultados obtenidos en primera instancia se lograron con solo una antena de frecuencia 250 MHz, que era la disponible; luego se dieron las condiciones para implementar la adquisición de datos con una antena de frecuencia 500 MHz.

En la zona rural del Centro Agropecuario Marengo no hubo buenos resultados en campo con los radargramas obtenidos, solo aceptables, por lo cual se decidió hacer procesado para lograr imágenes en 3D; en contraste, en el área semirural de la Granja Experimental Barcelona, ambas frecuencias dieron resultados satisfactorios, lo que evitó hacer más procesado. Lo anterior permite recordar que esta investigación está enfocada para ser práctica y tomar decisiones en el terreno.

#### *4.5.1.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera.*

Se seleccionaron los perfiles 2D obtenidos con la antena de 250 MHz para el periodo junio 2013-abril 2014 (figura 4-5). Las fosas clandestinas simuladas con cerdos como víctimas de asesinato, tanto en la profundidad de 0,8 metros (A1) como en la de 1,2 metros (A2) fueron en general imágenes con pobres eventos de reflexión hiperbólica, pero se convirtieron a través del periodo de estudio en menos claras después de 38 semanas de entierro. No fue posible distinguir las tumbas de control vacías (B1/B2) y se observaron con pérdida de continuidad en la señal. La simulación de las fosas con los restos esqueletizados, tanto a 0,8 metros (C1) y 1,2 metros (C2) mostraron eventos de reflexión de baja amplitud hiperbólica hasta 19 semanas después del entierro, pero fue imposible verlos después de este tiempo. Las fosas con restos óseos quemados y con la simulación de decapitados (D1/D2) no pudieron ser detectadas durante el periodo de estudio.

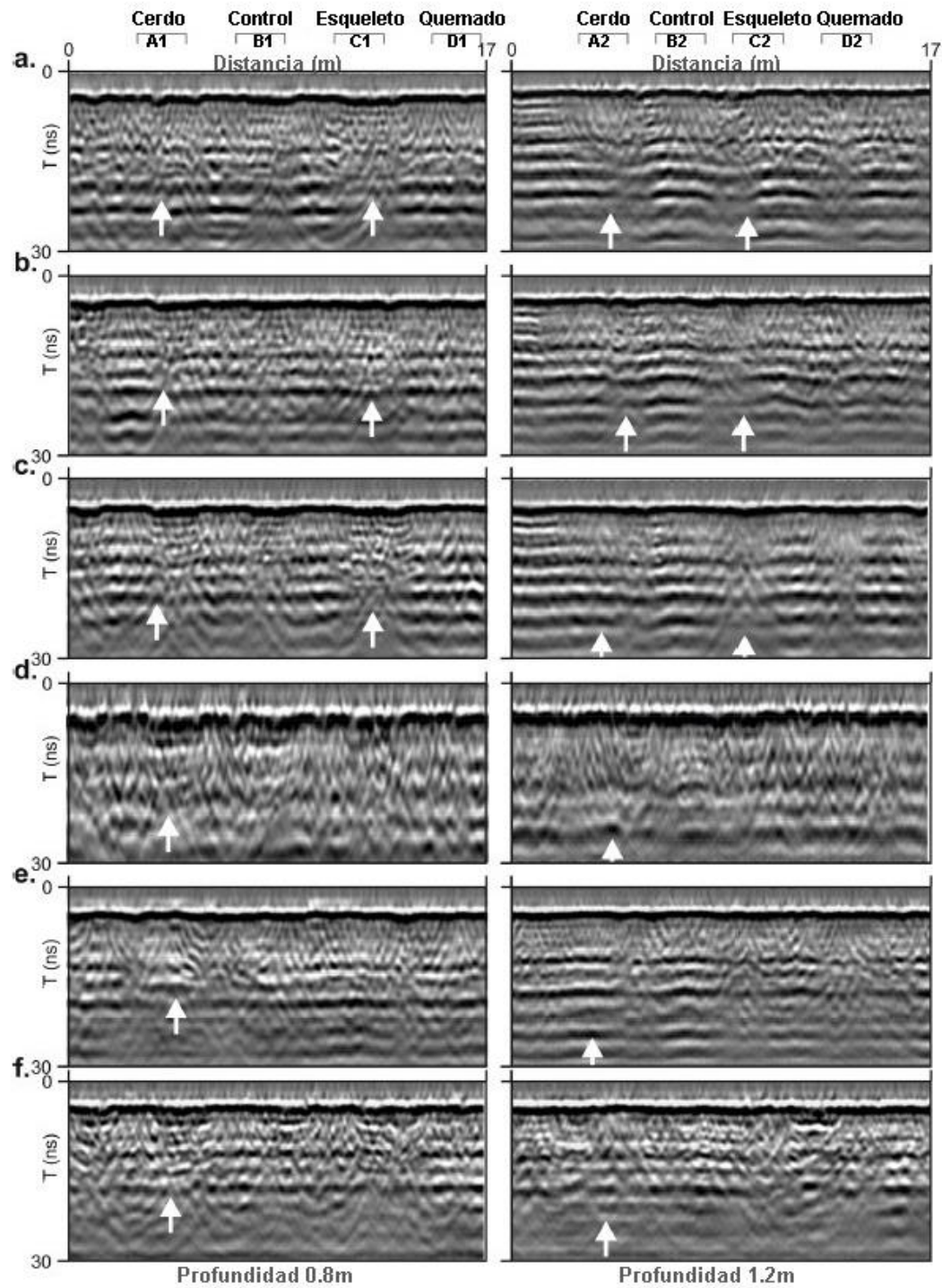
Las imágenes 3D en vista superior (figura 4-6), generadas a partir de los perfiles 2D, mostraron en general de forma sorpresiva buenos resultados para las respectivas 4, 15 y 19 semanas después del entierro, con anomalías discretas y amplitudes presentes en todos los segmentos de tiempo, que podrían ser correlacionadas con todas las posiciones de las fosas clandestinas simuladas. Sin embargo, estos lugares de destino tenían de forma progresiva la reducción de las amplitudes de señal de radar para las semanas sucesivas 22, 33 y 38 en los entierros simulados a menor profundidad, pero en particular el entierro de los cerdos con medio cuerpo cubierto pudo ser identificado de forma clara durante la mayor parte del tiempo de estudio.

Luego, para el periodo de mayo a septiembre de 2014 también fueron seleccionados los radargramas, que se obtuvieron con frecuencias 250 MHz y 500 MHz, tanto para la profundidad de ~ 0,80 metros (figura 4-7) como para la de ~ 1,20 metros (figura 4-8). Con la primera se pudieron detectar las fosas simuladas de los cerdos (A1/A2) como víctimas de asesinato en todo el periodo del estudio, con excepción de las semanas 50 y 54. Para los datos obtenidos con la segunda antena, solo el cerdo (A1) enterrado a 0,8 metros de profundidad fue detectado.

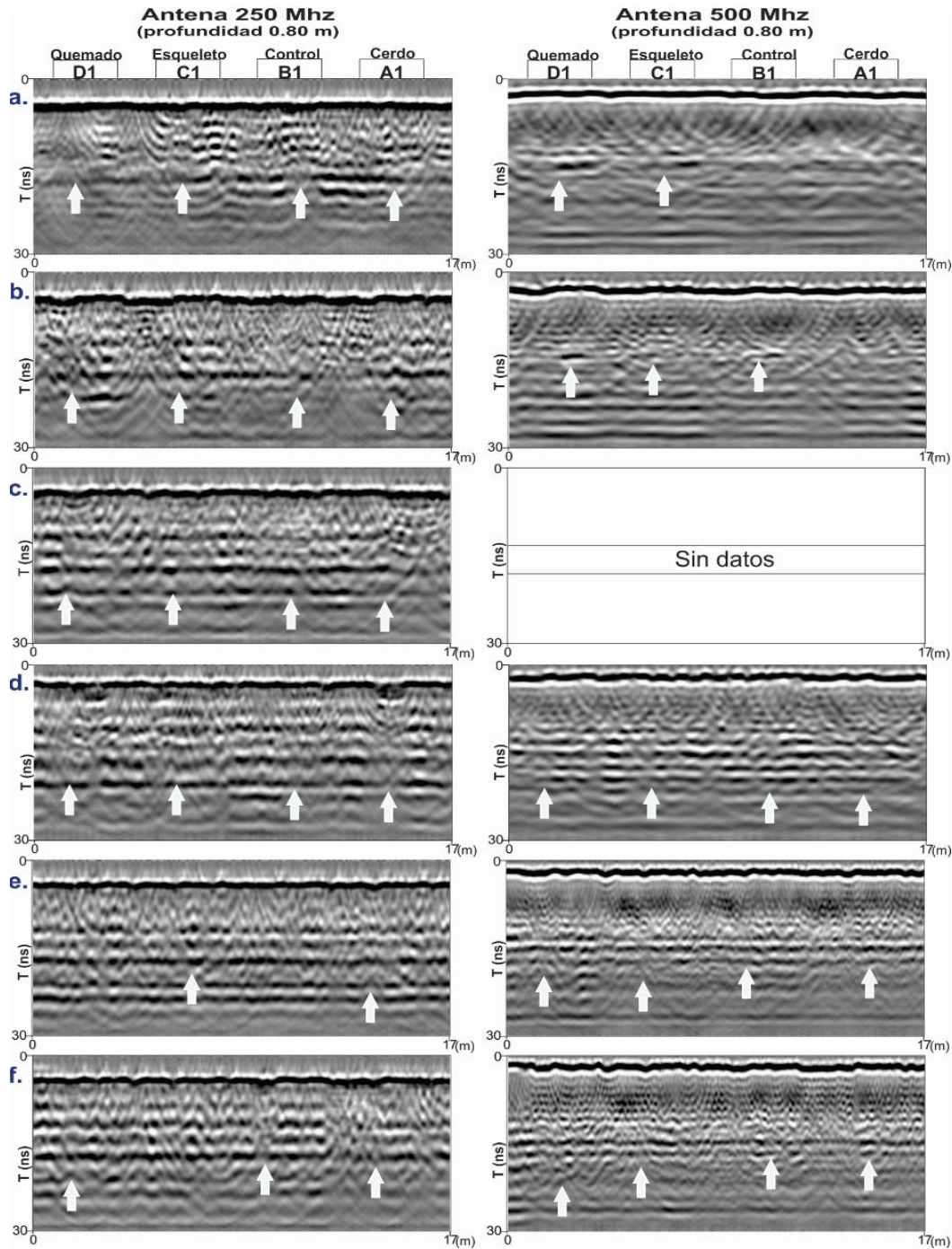
Las tumbas vacías y las que contenían restos óseos quemados y con la simulación de un decapitado, tampoco pudieron ser detectadas con alguna de las dos antenas, lo que representó áreas de pérdida de continuidad de la señal. En contraste con las 23 a 40 semanas, los resultados del conjunto de datos posentierro que se muestran en Molina, *et al.* (2015), las fosas simuladas con restos esqueletizados, tanto a 0,8 metros de profundidad (C1) como a 1,2 metros (C2), mostraron eventos de baja amplitud de reflexión hiperbólicas hasta la semana 94 después del entierro, en los perfiles de 250 MHz y 500 MHz.

Las imágenes 3D con la frecuencia de 250 MHz (figura 4-9, izquierda) permitieron detectar las fosas menos profundas, con excepción del cerdo (A1), que fue aceptable durante las semanas 46 y 54. En cuanto a las fosas más profundas, el resultado fue insatisfactorio con excepción de la semana 54, donde se observaron con definición las fosas A2, B2 y C2. El resultado con la antena de 500 MHz (figura 4-9, derecha) fue algo similar para las fosas cavadas a 0,80 metros, pero hubo una mejoría en la detección de las fosas con profundidad de 1,2 metros, tanto para el cerdo (A2) como para el control (B2) y esqueleto (C3) durante el periodo de estudio; la que contenía restos óseos se mantuvo sin ser definida.

**Figura 4-5:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D con antena de 250 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 4 semanas; **b.** 15 semanas; **c.** 19 semanas; **d.** 22 semanas; **e.** 33 semanas; **f.** 38 semanas. Las flechas muestran la posición del objetivo.

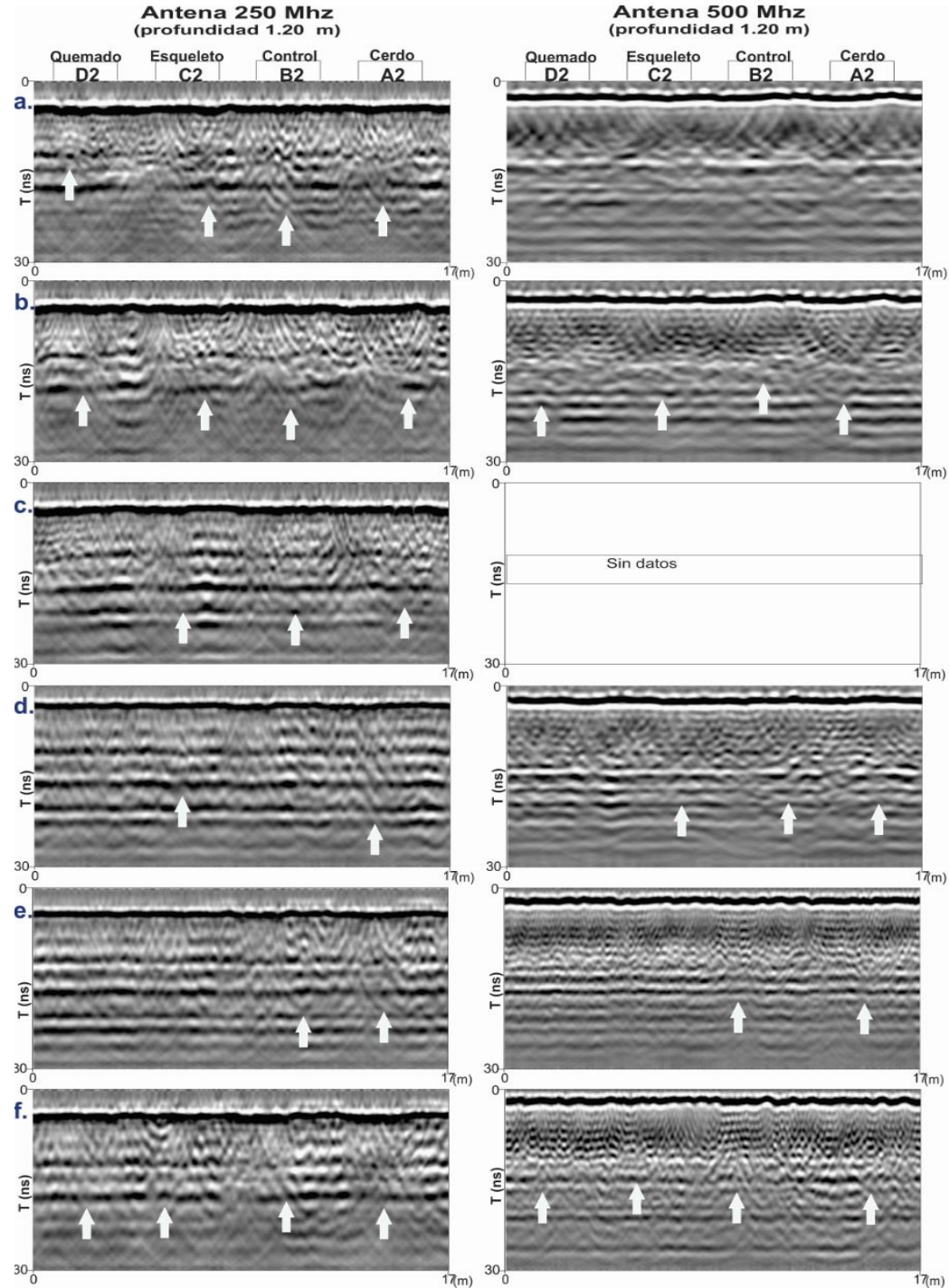


**Figura 4-6:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,80 metros de profundidad con antenas de 250 MHz y 500 MHz, tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y, **f.** 66 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble.

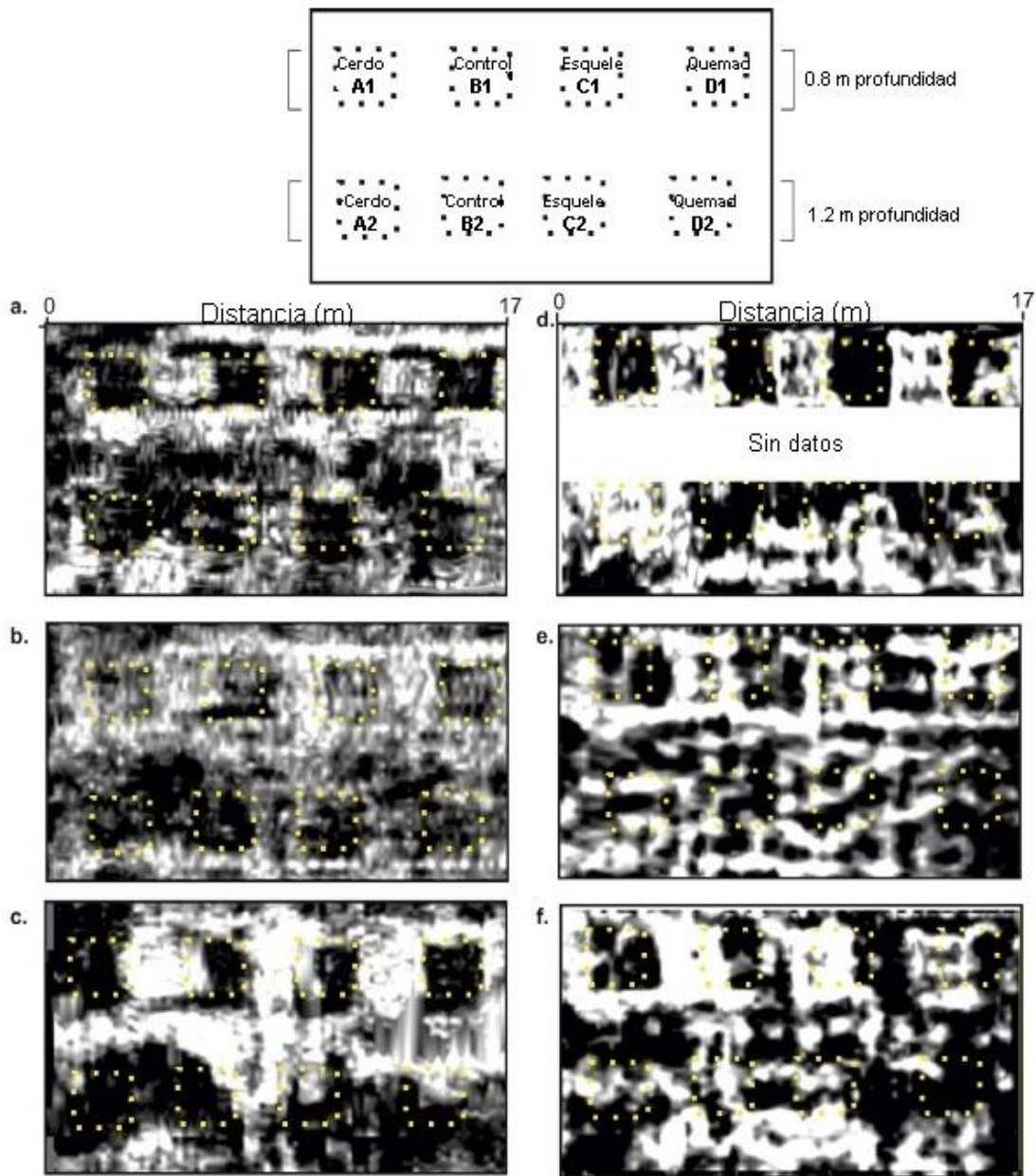




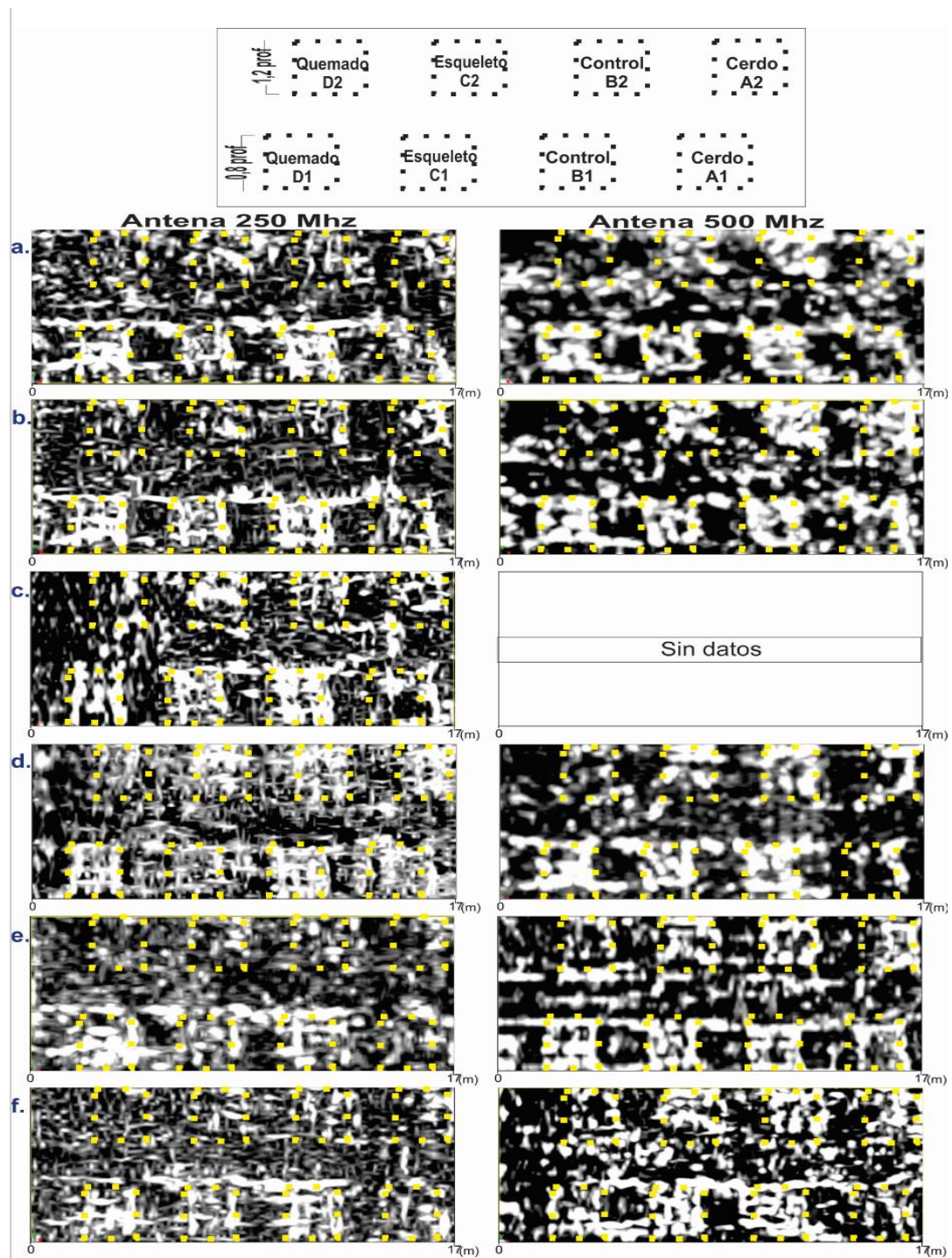
**Figura 4-7:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 1,20 metros de profundidad, con antenas de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y, **f.** 66 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble.



**Figura 4-8:** Secuencia seleccionada de los perfiles 3D con antena de 250 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 4 semanas; **b.** 15 semanas; **c.** 19 semanas; **d.** 22 semanas; **e.** 33 semanas y, **f.** 38 semanas después del entierro. Los puntos delimitan las fosas.



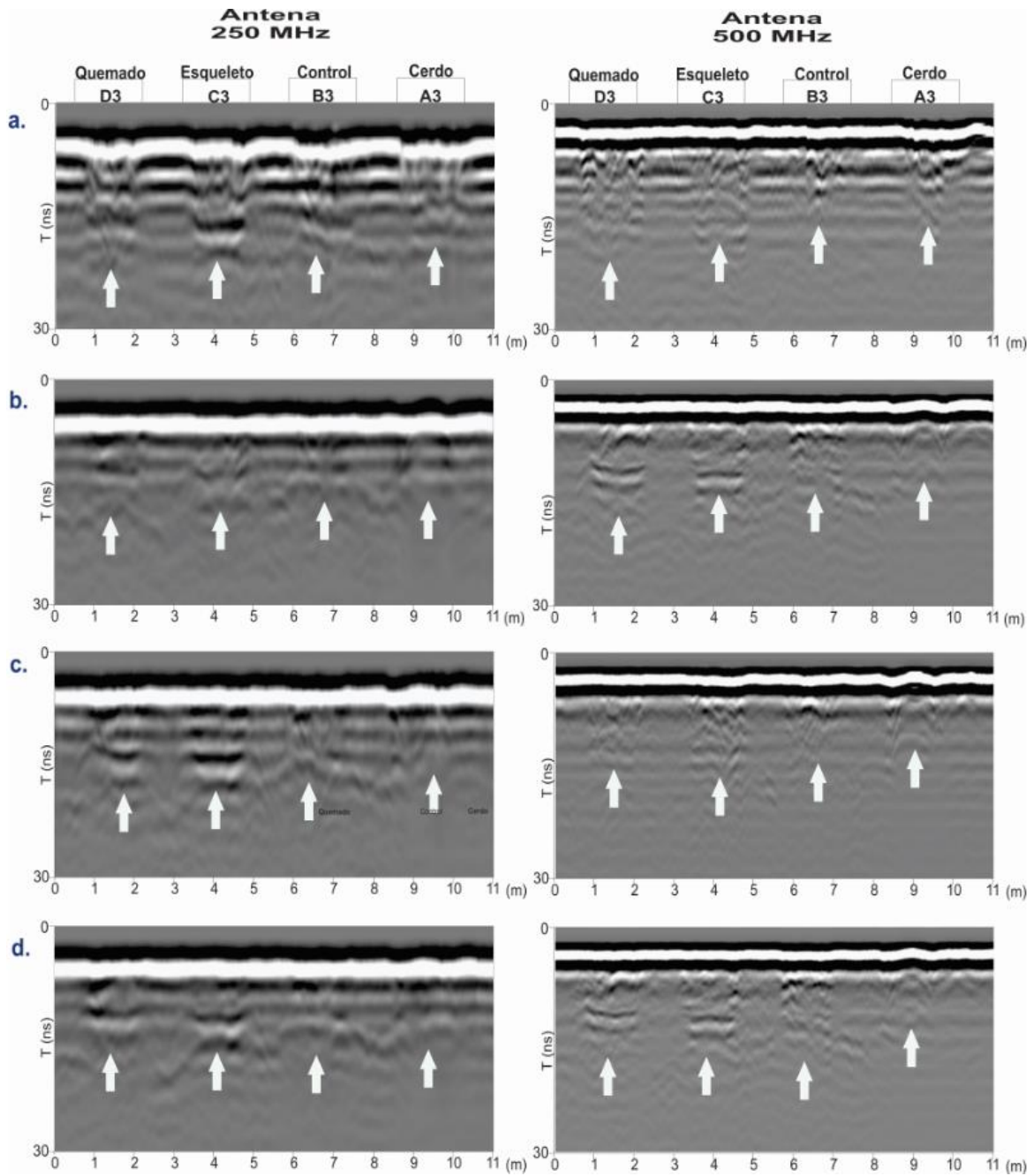
**Figura 4-9:** Secuencia seleccionada de los perfiles 3D con antena de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 42 semanas; **b.** 46 semanas; **c.** 50 semanas; **d.** 54 semanas; **e.** 63 semanas y **f.** 66 semanas después del entierro. Los puntos delimitan las fosas.



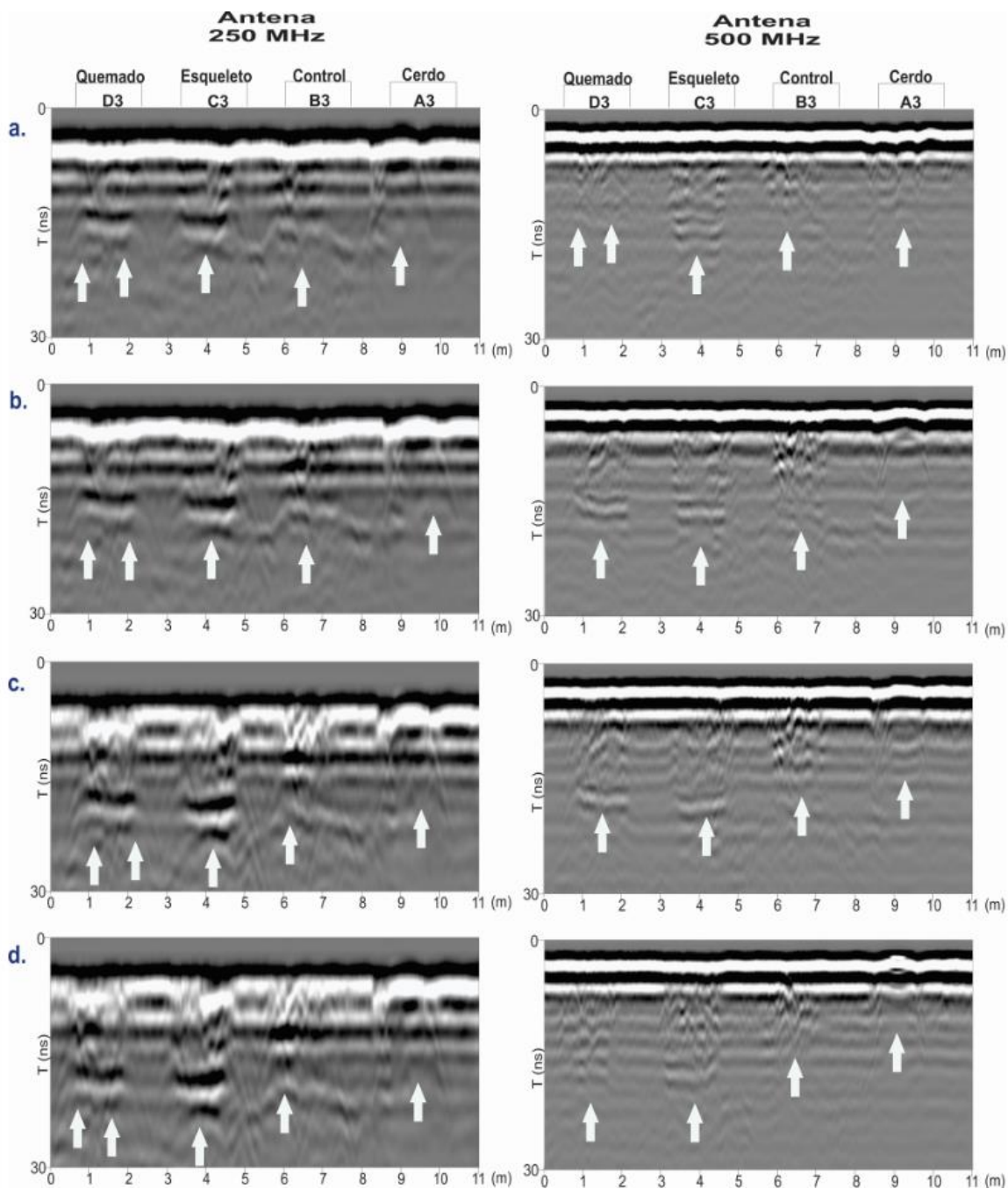
#### ***4.5.1.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio***

Los perfiles 2D adquiridos y seleccionados durante el periodo de estudio con las antenas de frecuencias 250 MHz (figura 4-10; figura 4-11, izquierda) y 500 MHz (figura 4.10; figura 4.11, derecha) indican que la fosa simulada con el cerdo (A3) enterrado, fue bien detectada como un evento de reflexión hiperbólica durante todo el periodo de estudio, con excepción de la semana 21, donde hubo un débil reflejo. La fosa control vacía (B3) también tuvo buena respuesta con ambas frecuencias durante el tiempo de seguimiento. De igual forma, el esqueleto (C3) y los restos óseos quemados y los que simulan un decapitado (D3), fueron detectados durante todo el periodo del experimento; sin embargo, en contraste con la fosa del cerdo, las otras presentaron fuertes reflejos horizontales en lugar de eventos de reflexión hiperbólica. Dichos resultados fueron más evidentes con la frecuencia de 250 MHz que con los datos de frecuencia 500 MHz. En este ambiente semirural y a 0,50 metros de profundidad hubo muy buena respuesta de todas las fosas al georradar.

**Figura 4-10:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,50 metros de profundidad con antenas de 250 MHz y 500 MHz tomados sobre las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 1 semana; **b.** 13 semanas; **c.** 17 semanas; **d.** 21 semanas después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble.



**Figura 4-11:** Secuencia seleccionada de los perfiles 2D a 0,50 metros de profundidad, con antenas de 250 MHz y 500 MHz, tomados sobre las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona, que muestra los siguientes tiempos: **a.** 25 semanas; **b.** 34 semanas; **c.** 38 semanas; **d.** 43 semanas, después del entierro. Las flechas muestran la posición del objetivo. T (ns) es tiempo doble.



## 4.5.2 Susceptibilidad magnética.

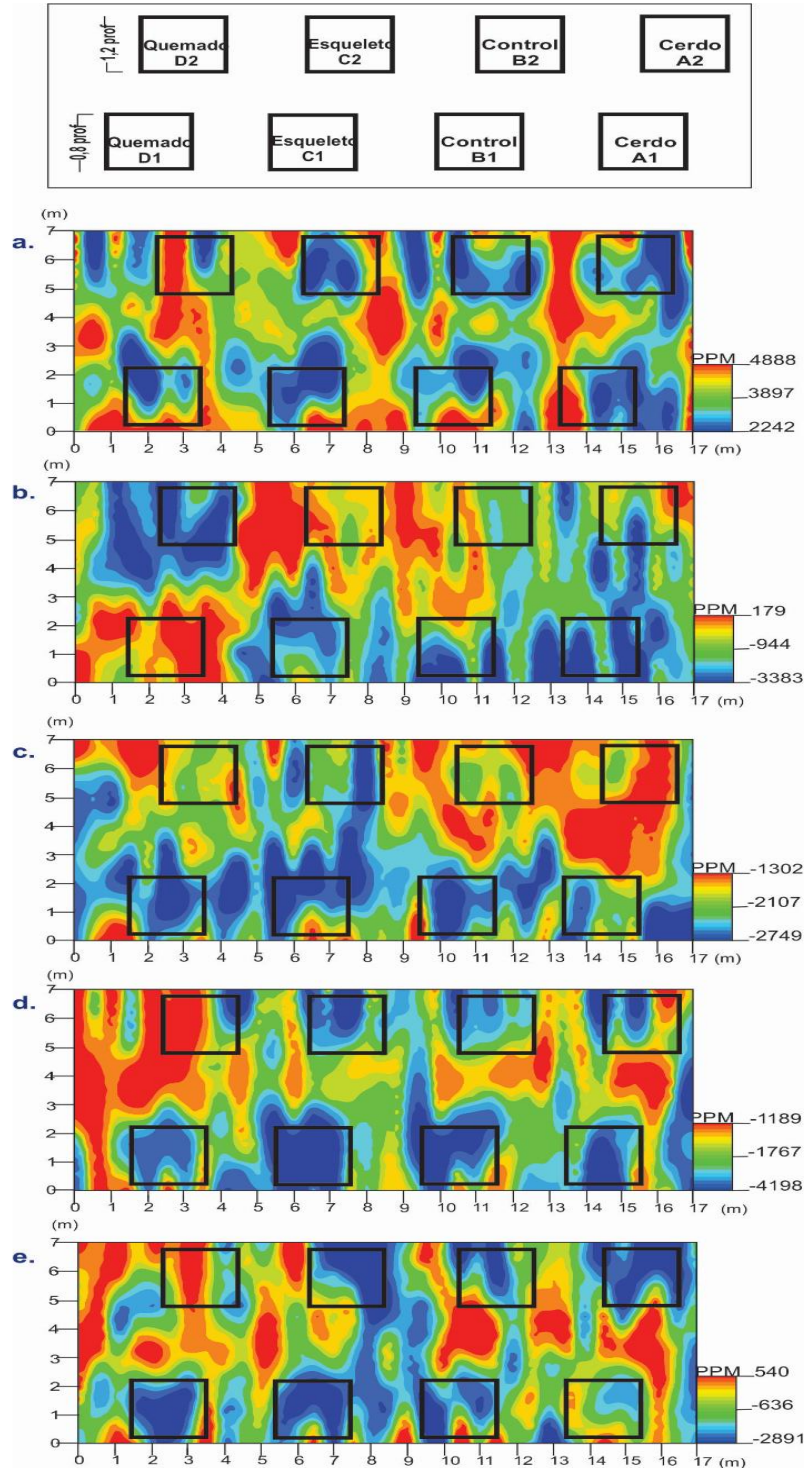
En los pocos estudios con fines forenses en que se ha usado ha dado resultados mixtos, algo que también sucedió en esta investigación en ambos laboratorios experimentales, pero con tendencia a ser útil para identificar los objetivos. Por primera vez se reporta la respuesta de las fosas a este método con un equipo Profiler 400 GSSI, ya que, como se mencionó en 3.5.4.1.2, no se encontraron publicaciones que mencionen su uso, algunas referencias solo hablan de otras referencias, como los Geonics (Linford, 2004). El equipo entrega unidades de medida en partes por millón (PPM), que corresponden a la amplitud del campo magnético secundario, tal como es detectada por el receptor en relación con la amplitud del campo del transmisor (CEN/WS 059, 2011).

### 4.5.2.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera.

Los valores para las anomalías positivas estuvieron en un rango entre -1.302 PPM y 5.226 PPM, mientras las negativas fluctuaron durante todo el periodo del monitoreo desde -4.198 PPM hasta 2.749 PPM, con promedios entre 924 PPM y -1.341 PPM una vez se hizo el procesado con *despiking* (figuras 4-12 y 4-13). Los resultados *inphase* (en fase) de la componente real fueron variables; los enterramientos simulados con cerdos (A1/A2) fueron, por lo general, detectados con susceptibilidades magnéticas de valores bajos en comparación con los del *background*, en las semanas 52, 78, 94, 99 y 103, mientras que hubo resultados mixtos en las mediciones 68, 82, 86 y 90, y no fueron detectados en la semana 74.

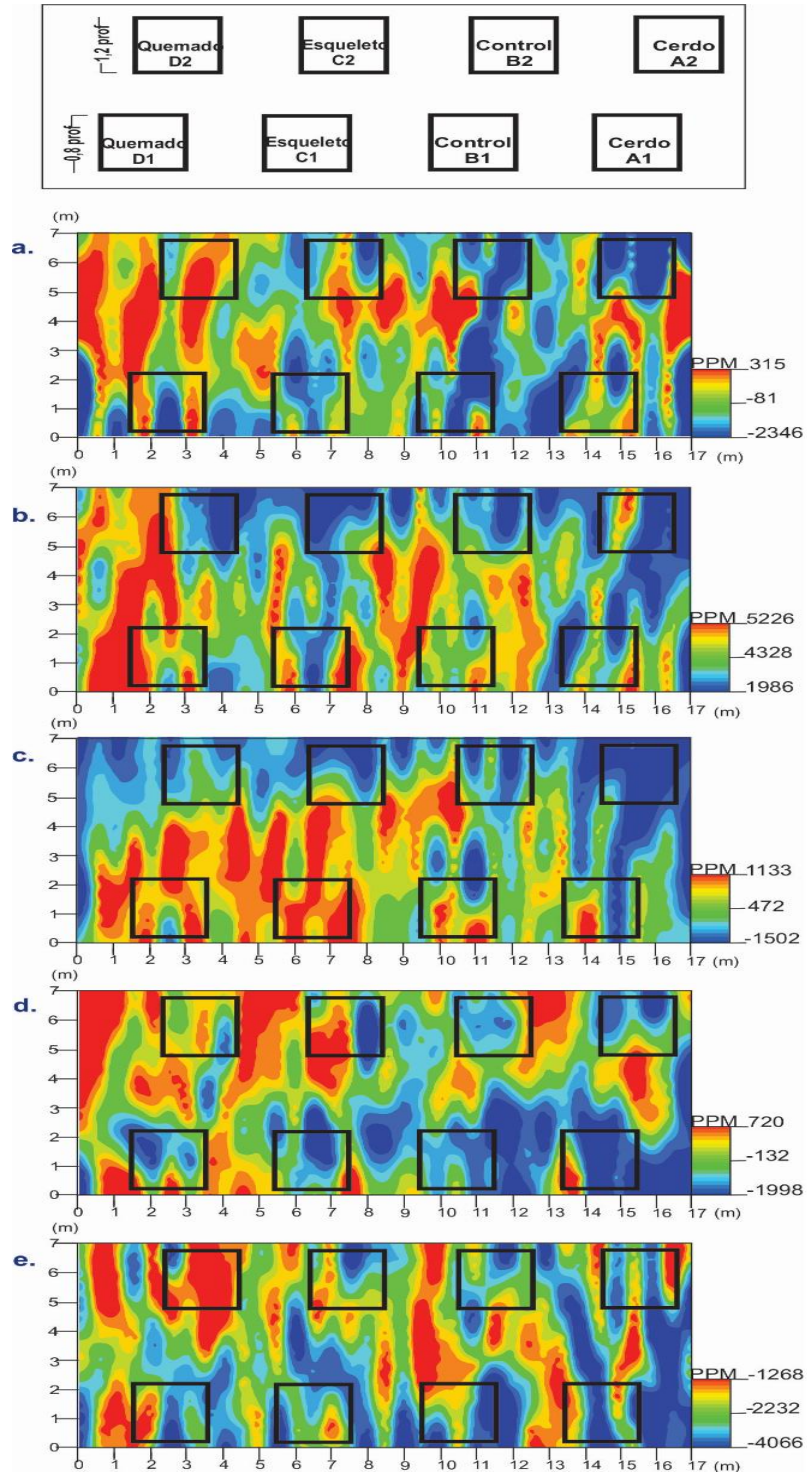
En el caso de las fosas control (B1/B2) hubo buen resultado con excepción de las semanas 68 y 99, donde no fue posible la detección. Los entierros con los esqueletos (C1/C2) también tuvieron buena respuesta, con excepción de las semanas 94 y 103. Para las fosas con restos óseos quemados y con la simulación de los decapitados sí hubo un ligero cambio en el resultado, ya que en semanas como la 82, 86, 94 y 99 fue detectado el entierro menos profundo (D1), mientras que el más profundo (D2) tuvo resultado opuesto. Las detecciones de las fosas mencionadas aparecen en los mapas como anomalías negativas, es decir, similar resultado al obtenido para los cerdos.

**Figura 4-12:** Mapas de susceptibilidad magnética de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 52 semanas; **b.** 68 semanas; **c.** 74 semanas; **d.** 78 semanas; **e.** 82 semanas después del enterramiento, respectivamente.





**Figura 4-13:** Mapas de susceptibilidad magnética de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 86 semanas; **b.** 90 semanas; **c.** 94 semanas; **d.** 98 semanas; **e.** 103 semanas después del enterramiento, respectivamente.

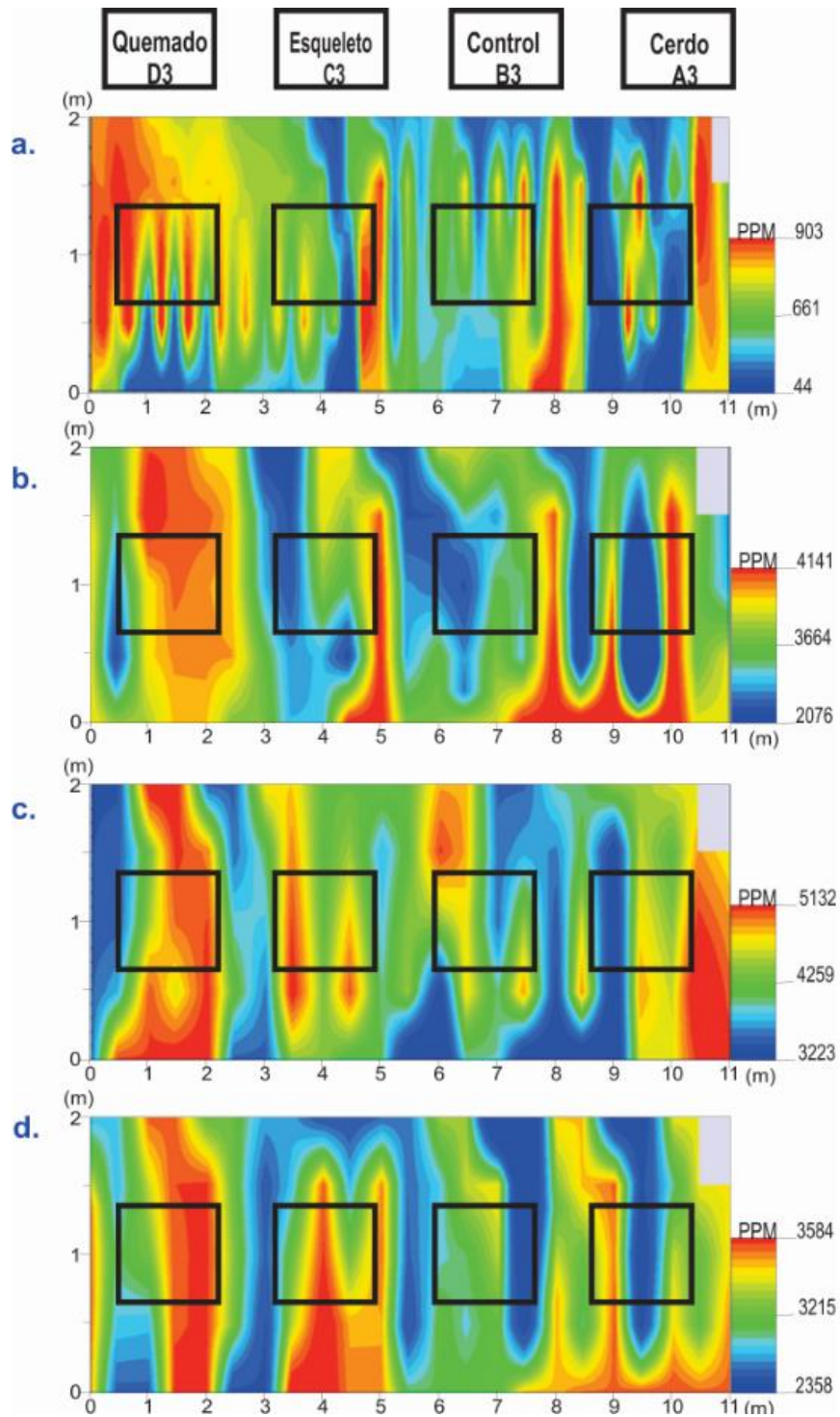


#### ***4.5.2.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio***

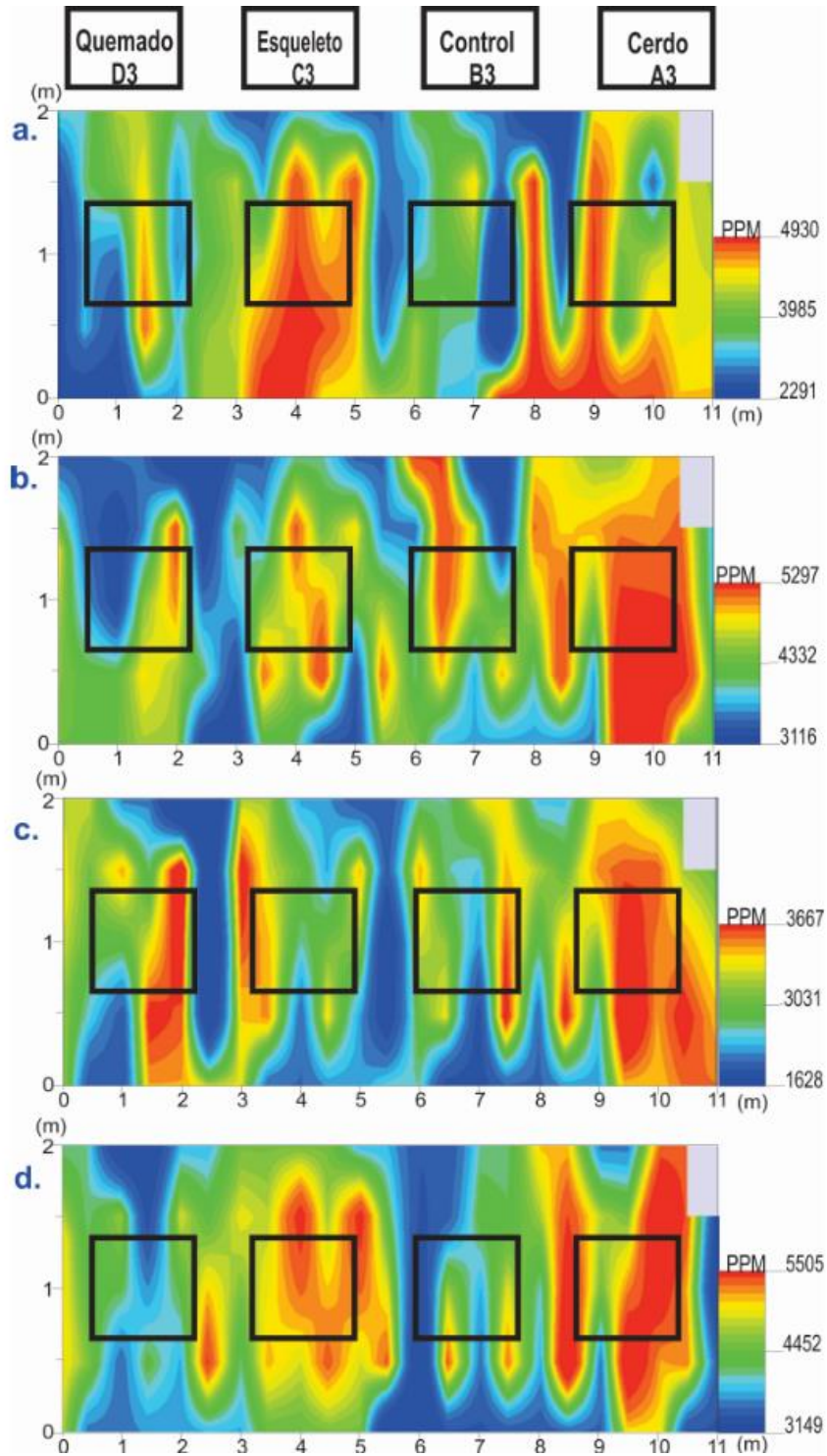
Los valores máximos de susceptibilidad para las anomalías positivas estuvieron en un rango entre -2.075 PPM y 7.106 PPM, mientras los valores mínimos de las anomalías negativas fluctuaron durante todo el periodo del monitoreo entre -3.383 PPM y 5.995 PPM, con promedios entre 3.404 PPM y 1.009 PPM una vez se hizo el procesado con *despiking* (figuras 4-14, 4-15 y 4-16). Los resultados *inphase* (en fase) de la componente real fueron variables con respecto a las anomalías negativas y positivas que permitieron detectar la posición del cerdo (A3), ya que las primeras estuvieron presentes de la semana 1 a la 13, las segundas de la 17 a la 34, y al final del estudio nuevamente las negativas. La respuesta fue positiva en gran parte del periodo de estudio; sin embargo, en las mediciones 17, 34 y 43 no fue clara la definición.

La fosa control (B3) tuvo resultados mixtos, tanto en anomalías como en detección. El esqueleto (C3) tuvo buenos resultados durante la mitad de las mediciones realizadas en el periodo de estudio, con una anomalía baja en la semana 5 y anomalías positivas en las demás detecciones. Los huesos quemados y con la simulación de un decapitado (D3) fueron identificados con la gran mayoría de anomalías positivas durante todo el periodo de estudio, excepto solo las semanas 5 y 47.

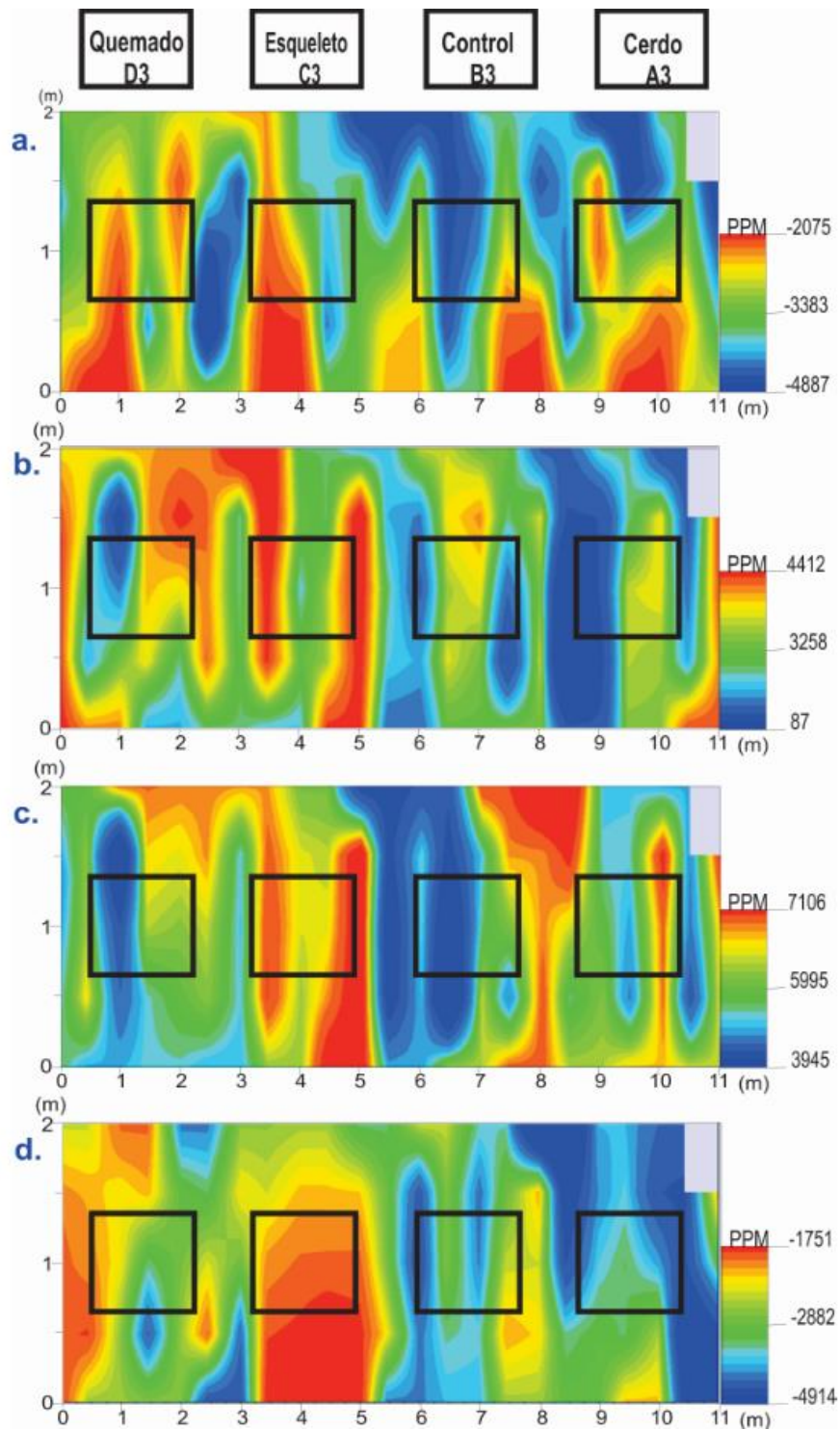
**Figura 4-14:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 1 semana; **b.** 5 semanas; **c.** 9 semanas; **d.** 13 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-15:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 17 semana; **b.** 21 semanas; **c.** 25 semanas; **d.** 30 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-16:** Mapas de susceptibilidad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 34 semanas; **b.** 38 semanas; **c.** 43 semanas; **d.** 47 semanas después del enterramiento, respectivamente.



### 4.5.3 Conductividad del suelo

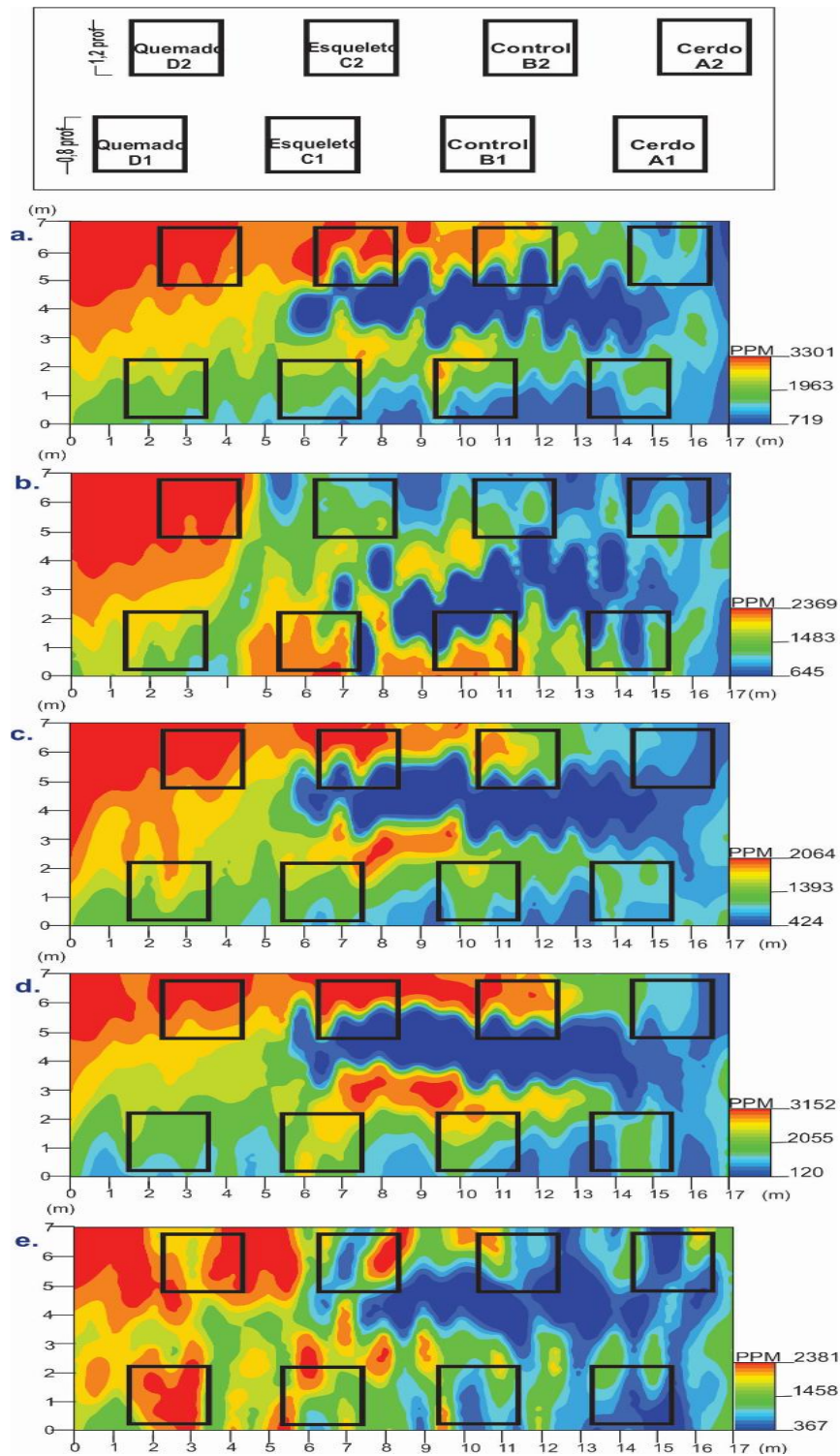
Durante el monitoreo se hizo su medición de forma simultánea con la susceptibilidad, de ahí que las unidades de medida fueran en partes por millón (PPM), como se dijo en 3.5.4.1.2, a diferencia de cuando se mide esta propiedad de forma independiente, que entrega unidades de Siemens/metro. Los resultados no fueron satisfactorios durante ningún momento del periodo de estudio.

#### 4.5.3.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera

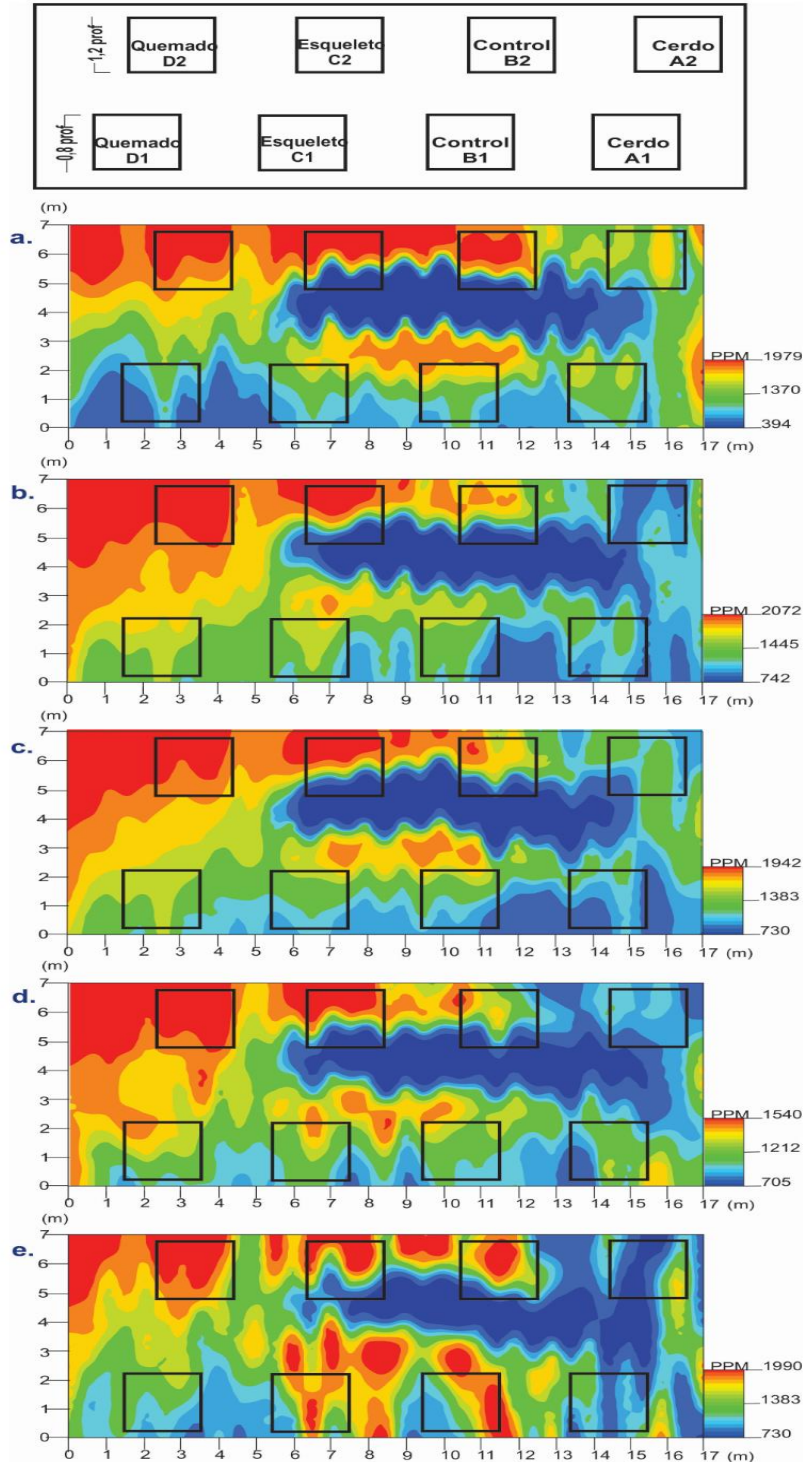
Los valores máximos de conductividad para las anomalías positivas estuvieron en rangos de 1.540 PPM a 3.301 PPM, mientras los valores mínimos para las anomalías negativas fluctuaron durante todo el periodo del monitoreo desde 120 PPM hasta 730 PPM, con promedios entre 2.279 PPM y 538 PPM una vez se hizo el procesado con *despiking* (figuras 4-17 y 4-18). En contraste con los resultados de susceptibilidad magnética, los datos obtenidos para la conductividad del suelo no permitieron detectar de forma satisfactoria las fosas.

Las escasas anomalías negativas que se observaron sobre algunas fosas en la componente *quadratura* fueron todas débiles, como en los cerdos (A1-A2) de las semanas 68 y 82; así mismo, en la semana 94 para A1 y en las mediciones 74 y 90 para A2. De todas las demás fosas, solo las de control (B1/B2) en la semana 82 fueron detectadas; las demás, es decir, las fosas con los esqueletos (C1-C2), huesos quemados y decapitado (D1-D2) presentaron valores positivos en PPM, pero sin marcar sobre los objetivos. La única respuesta que tuvo anomalía negativa evidente durante todas las mediciones estuvo localizada donde no se simulaban fosas.

**Figura 4-17:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 52 semanas; **b.** 68 semanas; **c.** 74 semanas; **d.** 78 semanas; **e.** 82 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-18:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 86 semanas; **b.** 90 semanas; **c.** 94 semanas; **d.** 98 semanas; **e.** 103 semanas después del enterramiento, respectivamente.

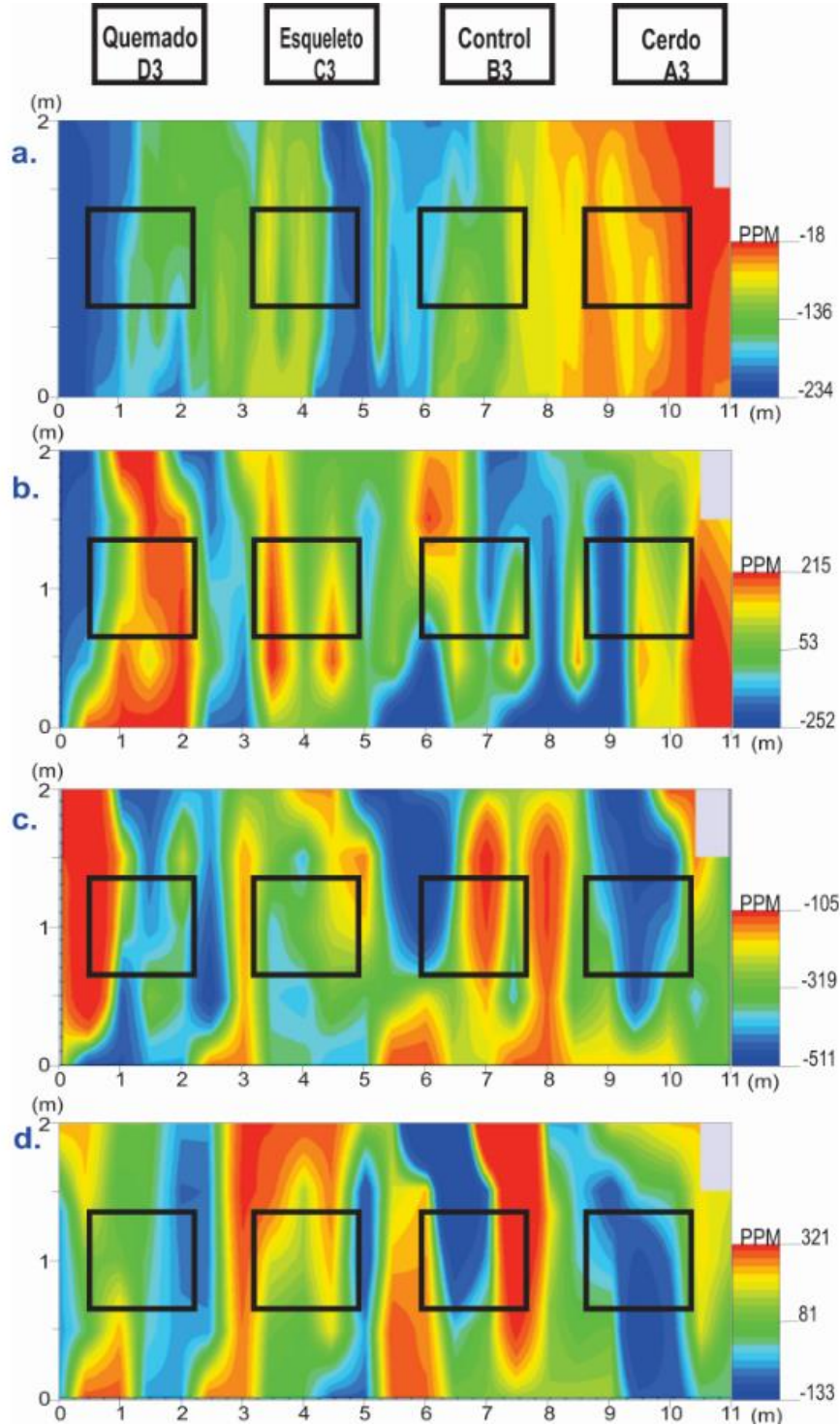




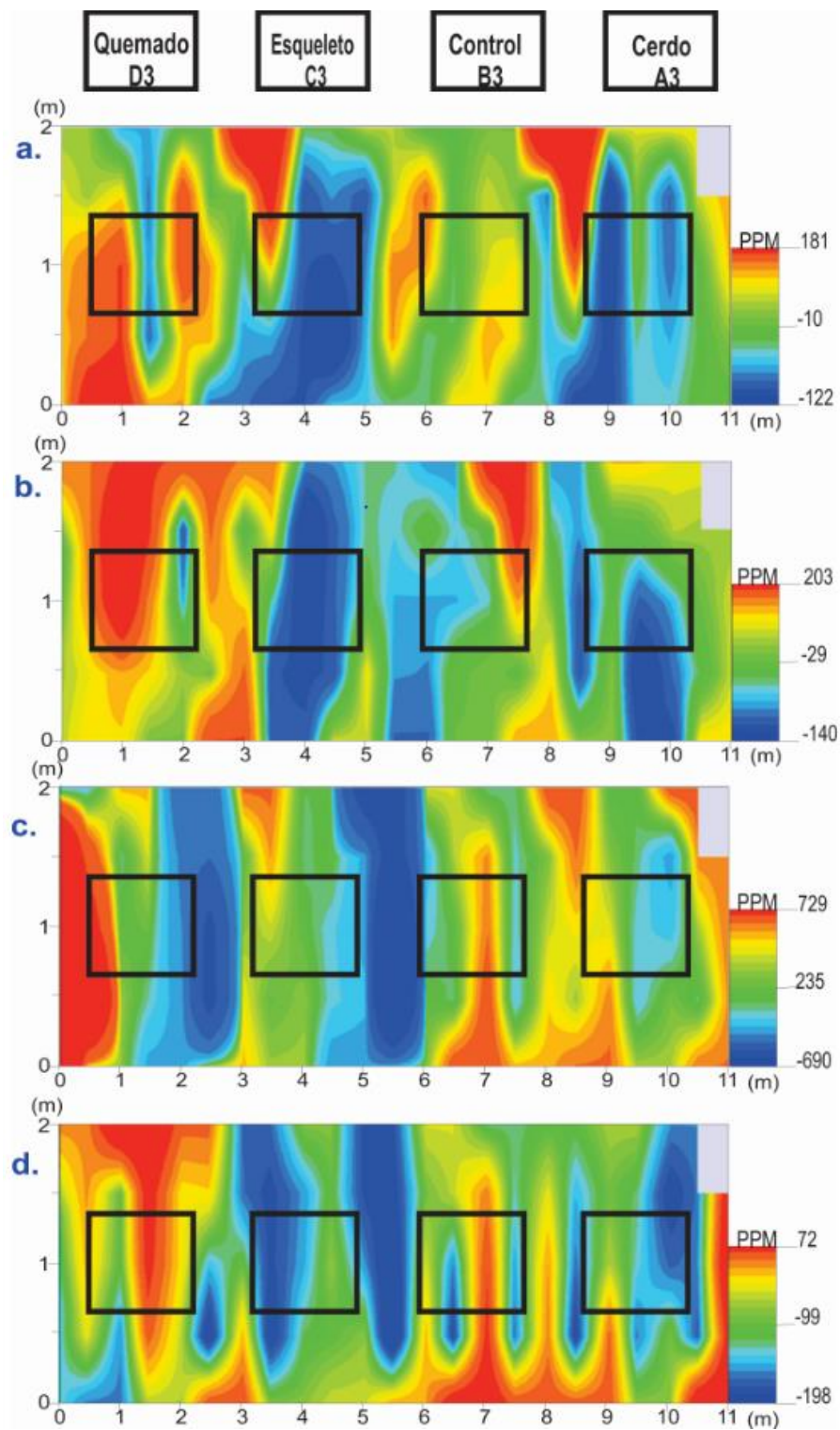
#### ***4.5.3.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio***

Los valores máximos de conductividad para las anomalías positivas estuvieron en un rango entre -105 PPM y 1.916 PPM, mientras los valores mínimos para las anomalías negativas fluctuaron durante todo el periodo del monitoreo desde -319 PPM hasta 452 PPM, con promedios entre 533 PPM y 35 PPM una vez hecho el procesado con *despiking* (figuras 4-19, 4-20 y 4-21). La conductividad del suelo (quadratura) presentó resultados más aceptables que los expuestos en el numeral anterior, por cuanto sí fue posible detectar el cerdo (A3) con anomalías negativas respecto de los valores de *background* durante todo el periodo de la investigación, con excepción solo de las semanas 1 y 43. La fosa control (B3) no fue detectada de forma clara durante el periodo de estudio. Tanto la fosa clandestina simulada con el esqueleto (C3) como la que tenía restos óseos quemados con un decapitado (D3), dieron resultados mixtos, producto de anomalías negativas y altas, y en otras ocasiones no se identificaron de forma clara.

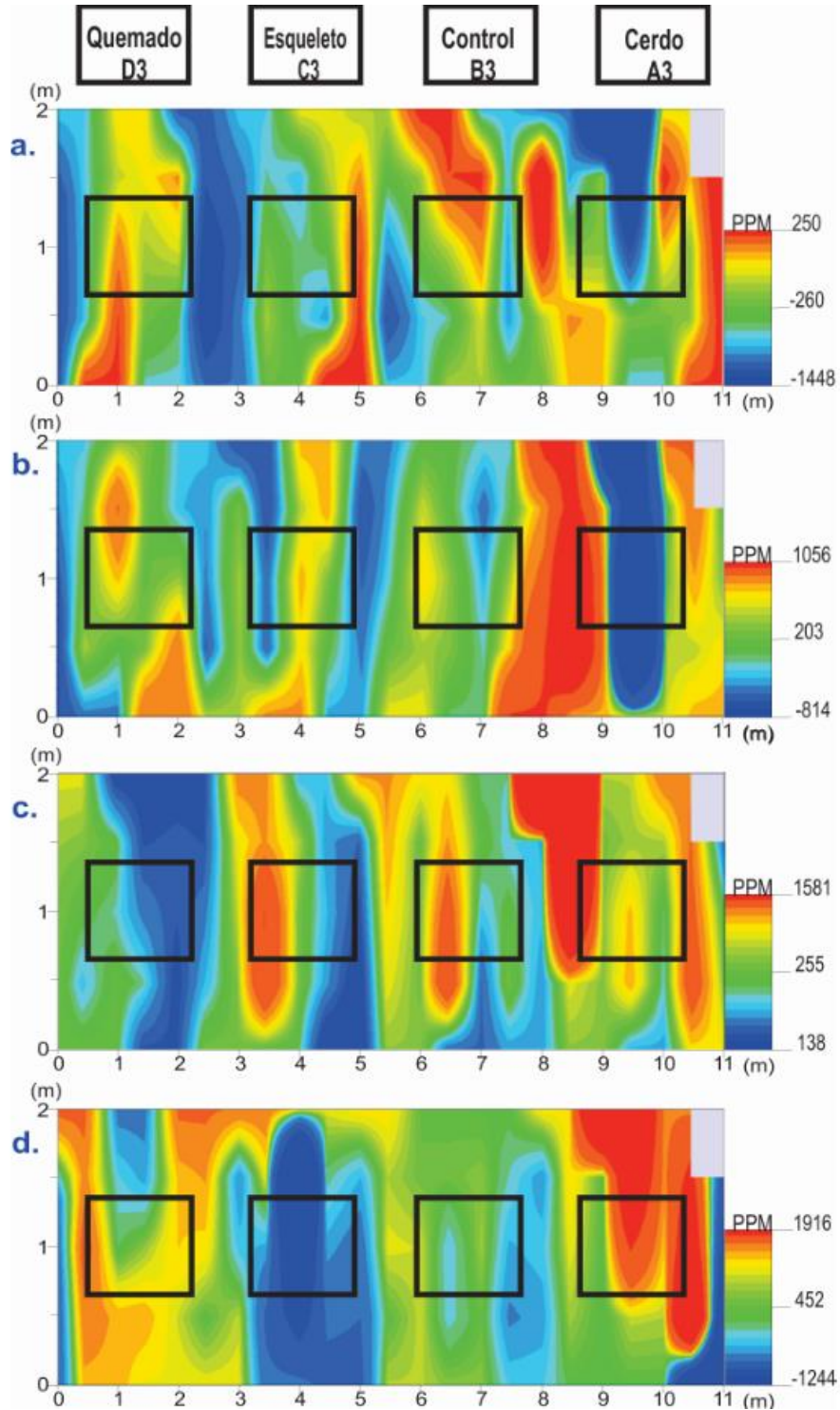
**Figura 4-19:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 1 semana; **b.** 5 semanas; **c.** 9 semanas; **d.** 13 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-20:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 17 semanas; **b.** 21 semanas; **c.** 25 semanas; **d.** 30 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-21:** Mapas de conductividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 34 semanas; **b.** 38 semanas; **c.** 43 semanas; **d.** 47 semanas después del enterramiento, respectivamente.



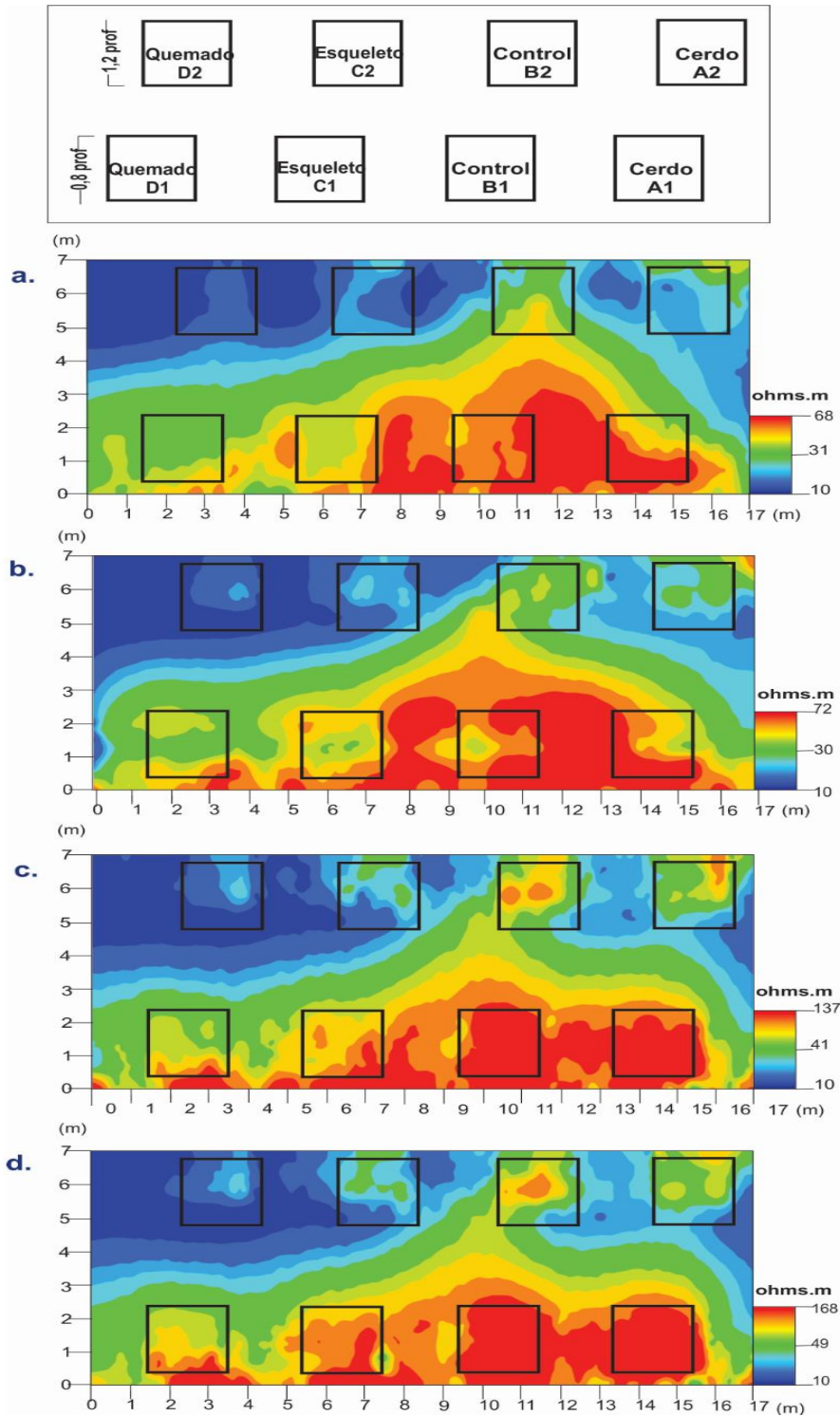
#### 4.5.4 Resistividad eléctrica

Es un método que dio muy buenos resultados en ambos laboratorios experimentales, y sería ideal si se dispone de un equipo que no implique colocar electrodos para adquirir los datos, ya que esto lo hace lento, como se comprobó durante todo el periodo de la investigación.

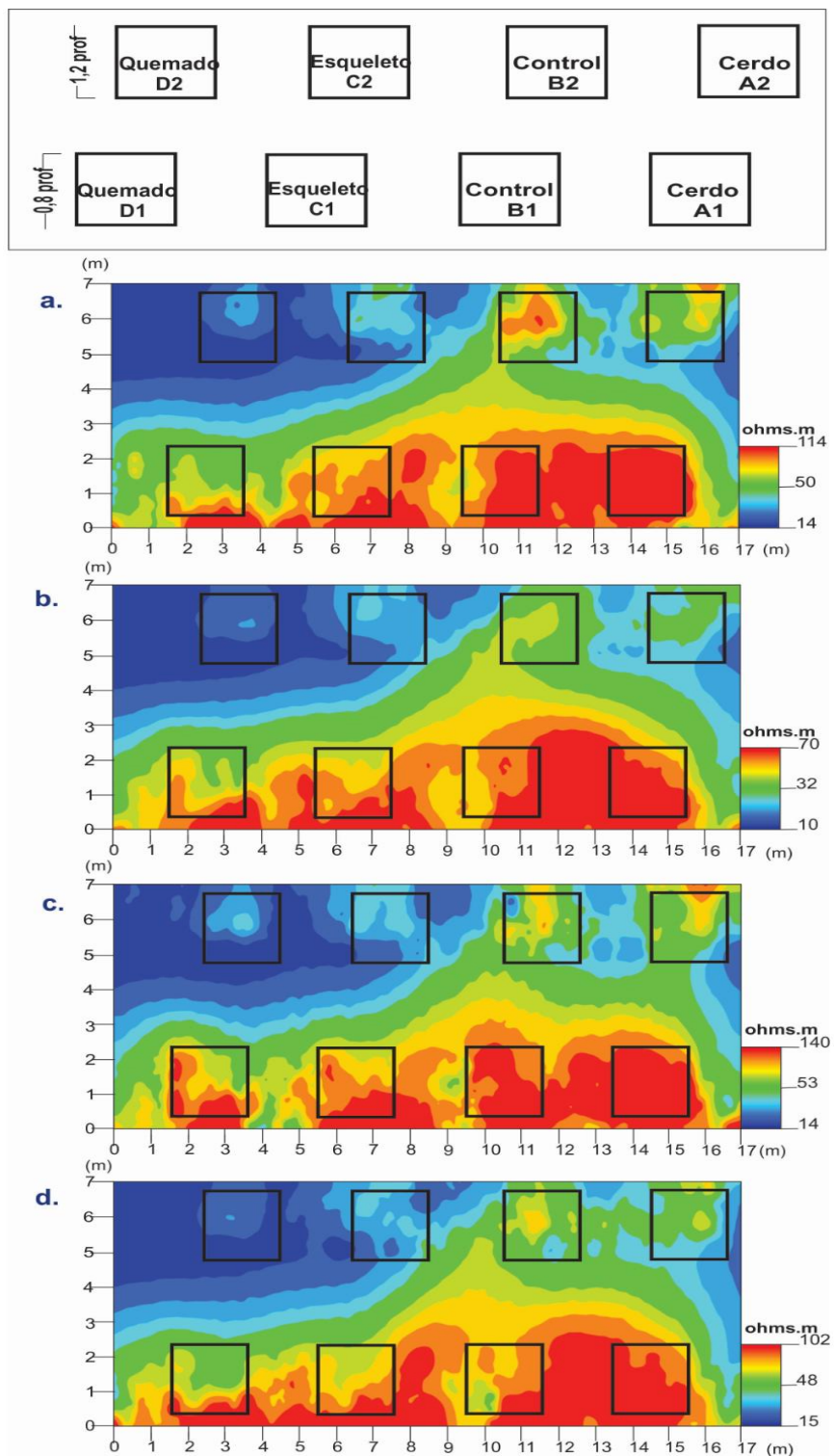
##### 4.5.4.1 Centro Agropecuario Marengo. Municipio de Mosquera.

Durante el periodo de estudio los valores máximos de resistividad eléctrica aparente fluctuaron entre 68  $\Omega$ .m y 221  $\Omega$ .m, mientras que los valores mínimos fueron de 10  $\Omega$ .m a 29  $\Omega$ .m, con promedios entre 124  $\Omega$ .m y 15  $\Omega$ .m, una vez se hizo el procesado con *despiking* (figuras 4-22, 4-23 y 4-24). Los conjuntos de datos procesados tuvieron en su mayoría una relativa tendencia a las anomalías con valores altos con respecto al *background* durante el periodo de estudio; sin embargo, se observó una diferencia entre las fosas cavadas a ~ 0,80 metros y las simuladas a 1,20 metros de profundidad; las primeras presentaron resistividades más altas que las segundas. Para los cerdos (A1-A2), todas las anomalías fueron positivas, aunque las de control (B1-B2) fueron algunas altas y otras bajas con respecto a los valores del *background*. Las fosas con los esqueletos presentaron contraste, por cuanto el inhumado en C1 siempre tuvo anomalías positivas, mientras el de C2 mostró anomalías negativas; este mismo comportamiento de resistividades altas y bajas fue encontrado en las fosas D1 y D2, respectivamente.

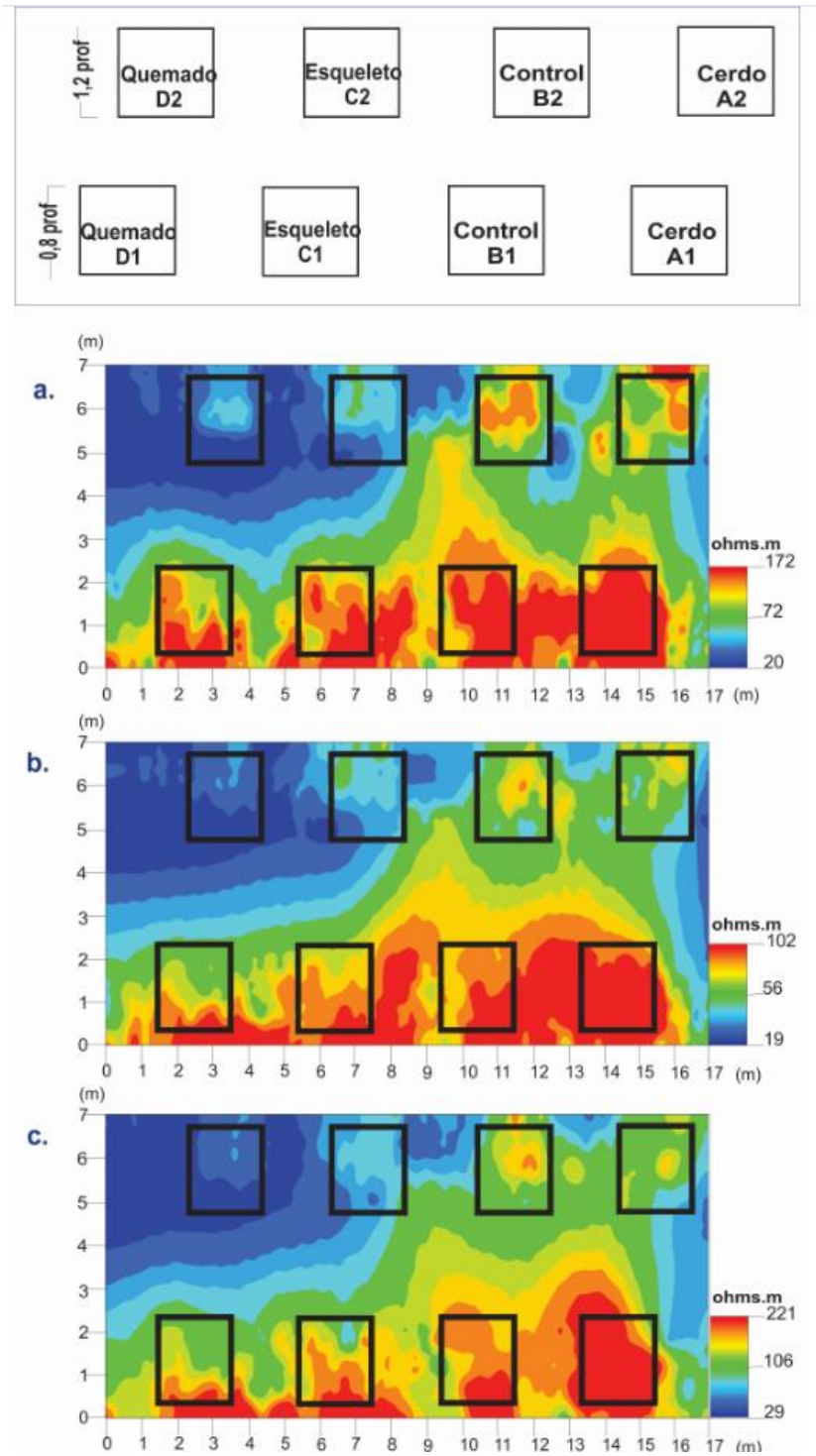
**Figura 4-22:** Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 52 semanas; **b.** 55 semanas; **c.** 59 semanas; **d.** 63 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-23:** Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 68 semanas; **b.** 74 semanas; **c.** 82 semanas; **d.** 86 semanas después del enterramiento, respectivamente.



**Figura 4-24:** Mapas de resistividad de las fosas simuladas en el Centro Agropecuario Marengo (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 90 semanas; **b.** 94 semanas; **c.** 103 semanas después del enterramiento, respectivamente.

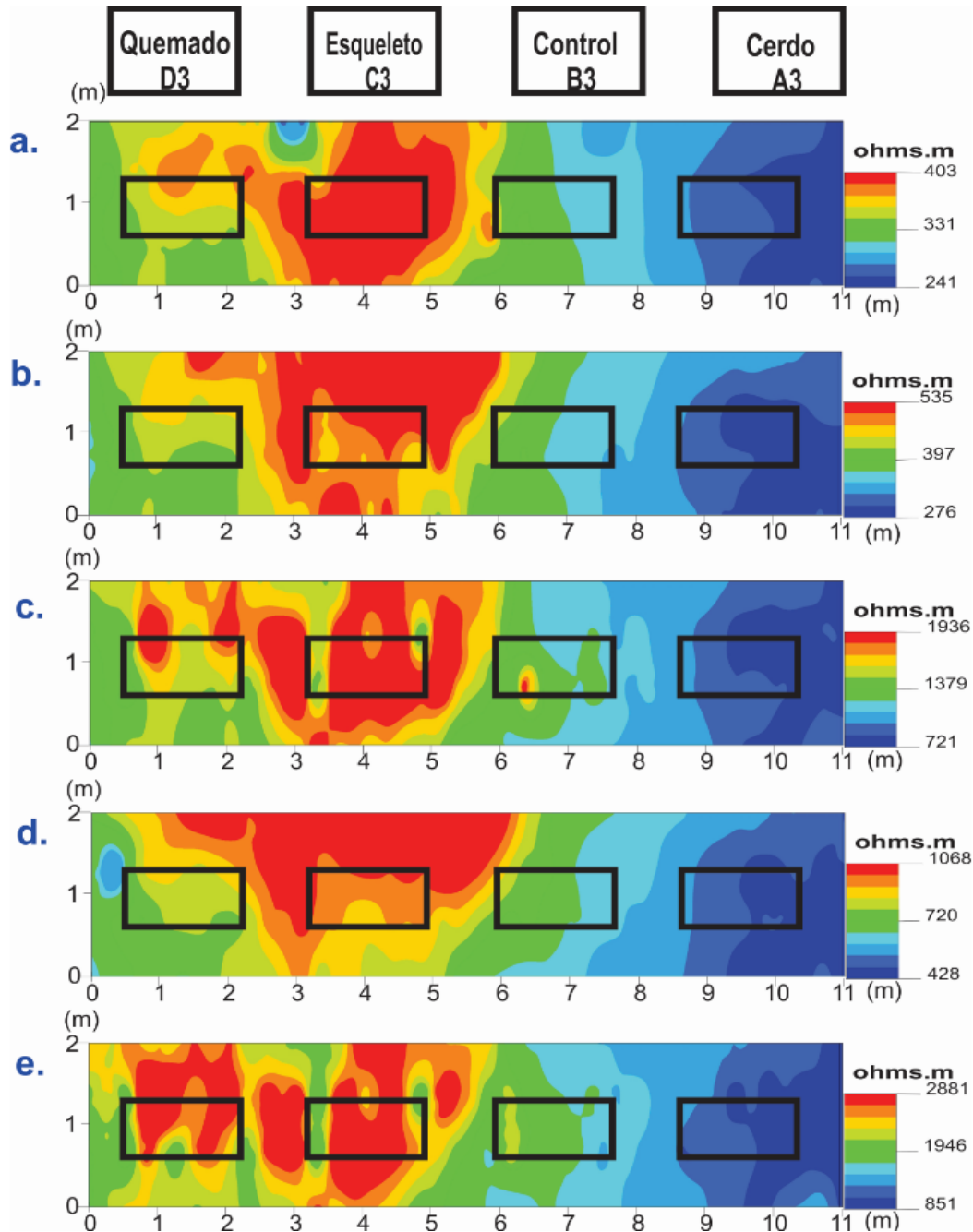




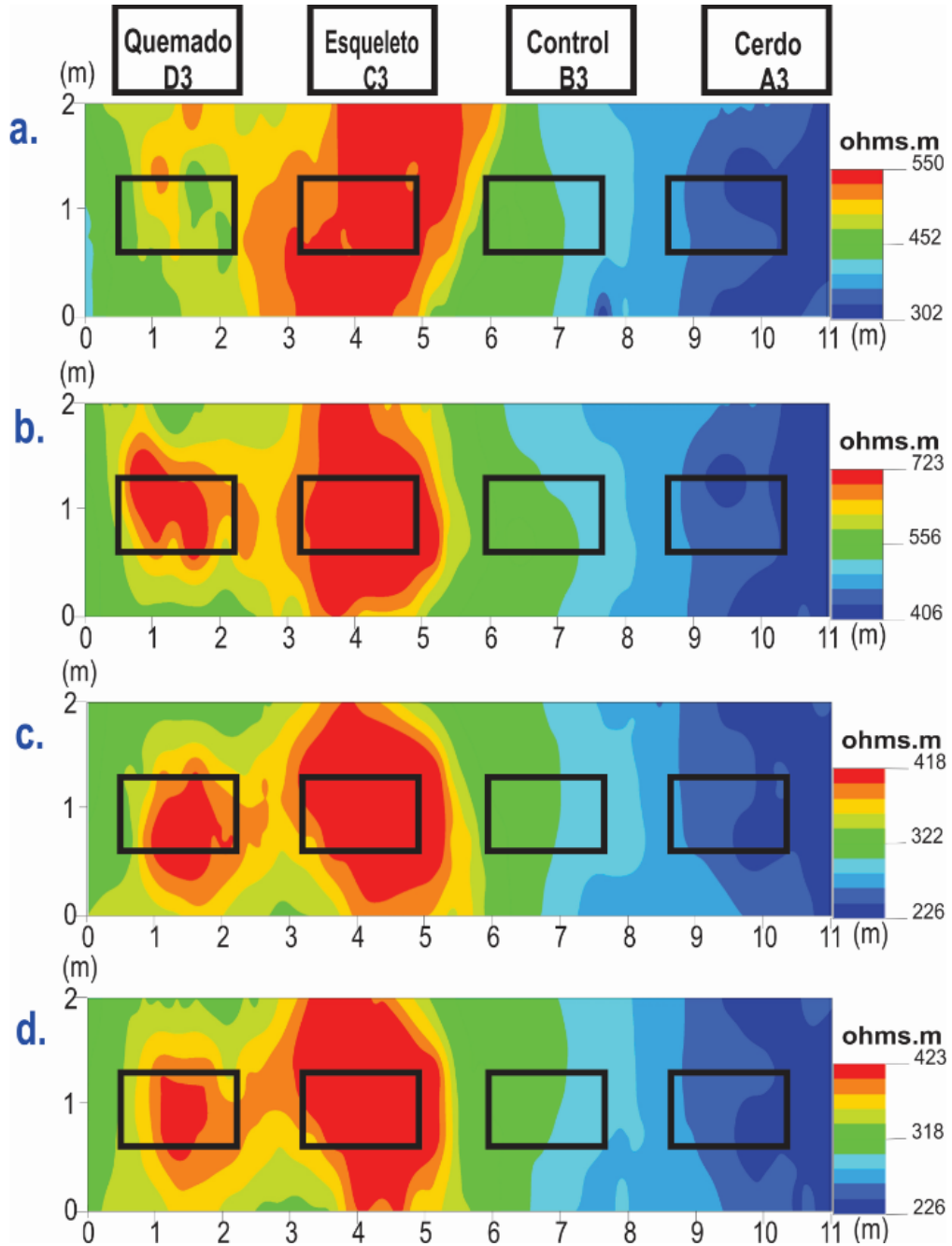
#### ***4.5.4.2 Granja Experimental Barcelona. Municipio de Villavicencio***

Durante el periodo de estudio los valores máximos de resistividad eléctrica aparente estuvieron entre 403  $\Omega$ .m y 2.881  $\Omega$ .m, mientras que los valores mínimos fluctuaron entre 226  $\Omega$ .m y 851  $\Omega$ .m, con promedios entre 993  $\Omega$ .m y 409  $\Omega$ .m, una vez hecho el procesado con *despiking* (figuras 4-25 y 4-26). Los conjuntos de datos mostraron anomalías negativas durante todo el periodo de estudio para la fosa del cerdo (A3), en contraste con la fosa del esqueleto (C3), que siempre fue positiva, y la que contenía los huesos quemados con un decapitado (D3), que también presentó valores altos con respecto a los del *background* y permitió ser detectada en las últimas mediciones de la investigación. A diferencia de los anteriores objetivos, el control (B3) en ningún momento permitió definir de forma clara una anomalía.

**Figura 4-25:** Mapas de resistividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 5 semanas; **b.** 9 semanas; **c.** 13 semanas; **d.** 17 semanas; **e.** 21 semanas después del entierro, respectivamente.



**Figura 4-26:** Mapas de resistividad de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona (la posición del objetivo se indica arriba). **a.** 25 semanas; **b.** 34 semanas; **c.** 43 semanas; **d.** 47 semanas después del entierro, respectivamente.



#### 4.5.5 Resumen de los resultados obtenidos del monitoreo de las fosas simuladas durante el periodo de estudio

Para la interpretación de cada uno de los métodos experimentados durante todo el periodo de estudio se definieron tres respuestas, tal como aparece en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Clasificación de las respuestas geofísicas en las fosas.

Clasificación	Respuesta geofísica a las fosas
Buena detección ●	Presencia clara de anomalías en comparación con el <i>background</i>
Media detección ◐	Presencia parcial o anomalía no evidente
No detección ○	Ausencia de anomalías en relación con el <i>background</i>

El consolidado de los resultados del Centro Agropecuario Marengo (tabla 4-4) y de la Granja Experimental Barcelona (tabla 4-5), muestra la respuesta dada por cada una de las fosas simuladas a cada uno de los cuatro métodos geofísicos utilizados durante todo el periodo del experimento.



**Tabla 4-5:** Resumen de los resultados obtenidos al monitoreo de las fosas simuladas en la Granja Experimental Barcelona durante el periodo de estudio.

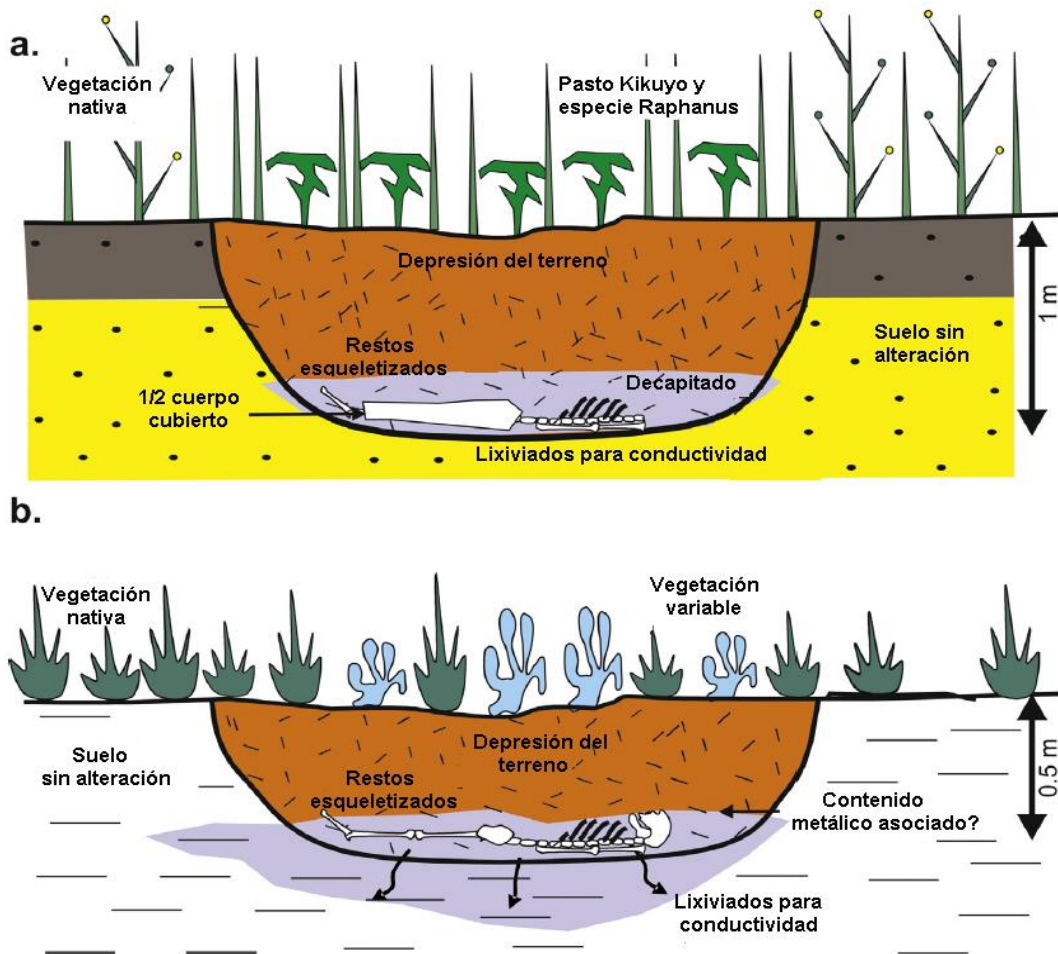
Semana	Método		Cerdo	Control	Esqueleto	Quemado y decapitado
			A	B	C	D
1	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		○	○	●	○
5	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	○	●	●
	Resistividad		●	○	●	○
9	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	●	●
	Resistividad		●	○	●	○
13	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	○	●
17	Resistividad		●	●	●	●
	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
Conductividad		●	○	●	●	
21	Resistividad		●	○	●	○
	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
Conductividad		●	●	●	●	
25	Resistividad		●	●	●	●
	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	○	●
Conductividad		●	●	●	●	
30	Resistividad		●	●	●	●
	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
Conductividad		●	●	●	●	
34	Resistividad		●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	●	●
38	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	●	●
43	GPR (MHz)	250	●	●	●	●
		500	●	●	●	●
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	●	●
47	Resistividad		●	○	●	○
	Suceptibilidad		●	●	●	●
	Conductividad		●	●	●	○

#### **4.5.6 Modelos comparativos de enterramientos en Colombia y países del hemisferio norte**

De acuerdo con lo enunciado en el numeral 2.2 sobre los modelos de fosas, se ilustra la diferencia y similitud en algunos aspectos entre las realizadas en el Centro Agropecuario Marengo, con un promedio de profundidad de 1,00 metro y un escenario común en países del hemisferio norte, que está representada a una profundidad de 0,50 metros (figura. 4-27). Además de la profundidad, es evidente el cambio de vegetación y el cadáver esqueletizado que estuvo envuelto medio cuerpo en el primer caso y desnudo en el segundo, pero es común la fuente de lixiviados que producen los cuerpos en descomposición.

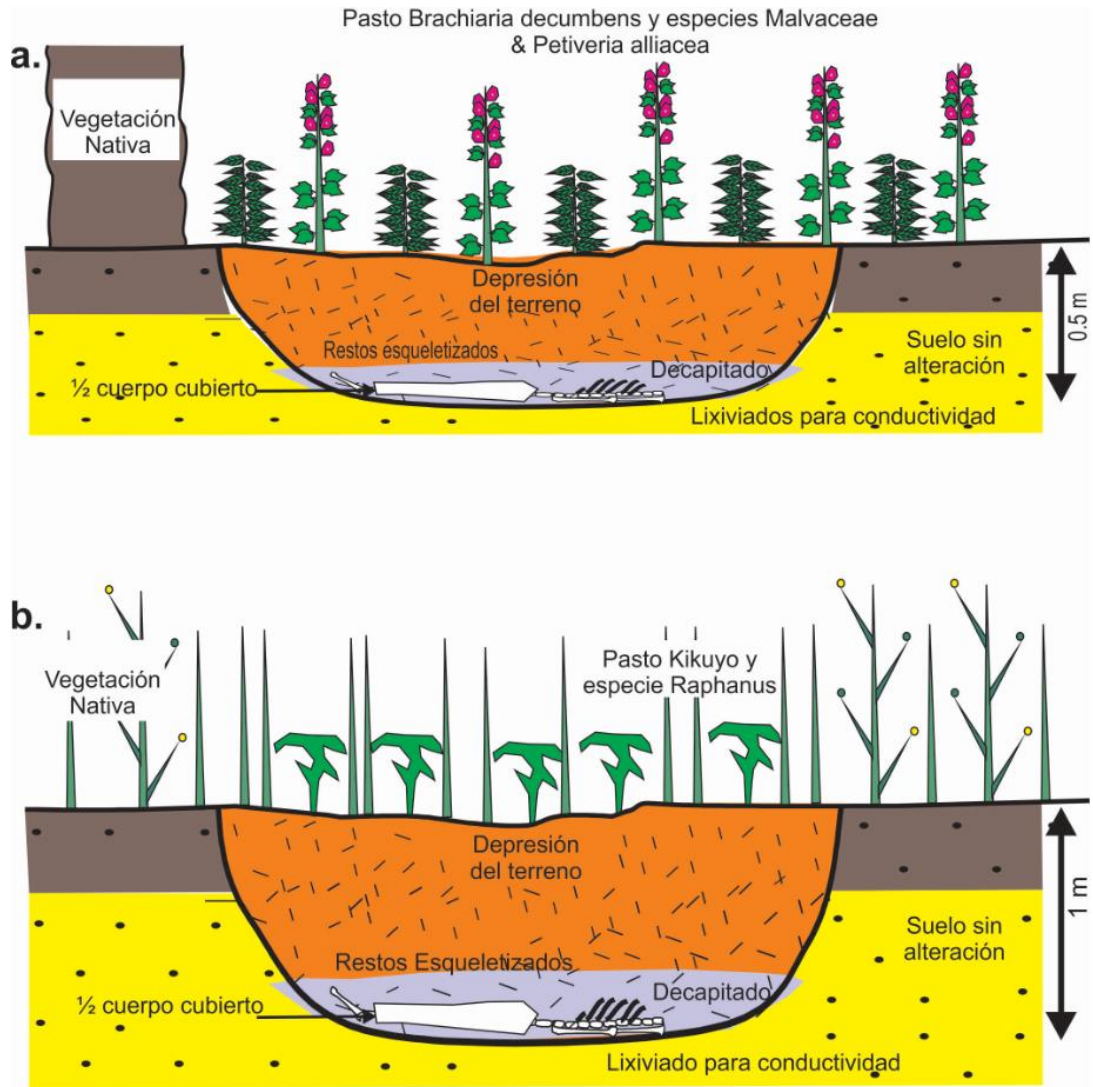
En forma análoga se puede apreciar la relación y diferencias entre los modelos de fosas realizados en el área semirural de la Granja Experimental Barcelona y la zona rural del Centro Agropecuario Marengo, la primera con una profundidad de 0,50 metros y la segunda a 1,00 metros; además de la profundidad, hay entre ellas clara diferencia en la vegetación. Los demás aspectos son similares.

**Figura 4-27:** Esquema de, **a.** enterramiento en fosa clandestina típica en Colombia; **b.** escenario en países del hemisferio norte (Modificado de Pringle *et al.*, 2012).





**Figura 4-28:** Esquema de, **a.** enterramiento en fosa clandestina Granja Experimental Barcelona; **b.** enterramiento en fosa clandestina Centro Agropecuario Marengo (modificado de Pringle *et al.*, 2012).



## 4.6 Conclusión

La cantidad de fosas clandestinas simuladas en esta investigación fueron más de las previstas en los objetivos de este trabajo; de la misma manera, el seguimiento al comportamiento de la vegetación fue una labor adicional.

Los resultados obtenidos permitieron identificar los contrastes de propiedades físicas con la mayoría de métodos geofísicos en el área semirural de la Granja Experimental Barcelona y de manera parcial en la zona rural del Centro Agropecuario Marengo, de ahí que los mapas obtenidos

como respuesta de los objetivos enterrados son suficientes para poder discutir en el próximo capítulo los resultados, tanto a escala temporal durante el monitoreo, como espacial dentro del área de cada laboratorio.

Los *software* utilizados fueron funcionales para efectos de tomar decisiones de forma rápida en campo durante unas mediciones y también generaron duda en otras oportunidades. Además, se tuvieron en cuenta variables ambientales para poder relacionar sus posibles efectos en la detección o no de anomalías sobre los sitios de interés.

# Capítulo 5

## 5. Discusión

Se enfoca en la discusión de los objetivos planteados en el capítulo 1 con el fin de evaluar las respuestas geofísicas de las fosas simuladas a partir de las variables de profundidad, tiempo de enterramiento, pluviosidad y textura del suelo. De igual forma, en examinar la metodología utilizada durante el monitoreo en los dos laboratorios experimentales y la estimación de tiempos aproximados para prospección de terrenos con la aplicación de los métodos de geofísica GPR, resistividad eléctrica, electromagnetismo, conductividad y susceptibilidad magnética.

### 5.1 Introducción

En el capítulo 4 se presentaron los resultados obtenidos a partir de la metodología detallada y desarrollada en el capítulo 3. Aquí se tratan todos los aspectos de interpretación e incidencia en el contexto de los objetivos de la investigación dirigidos a determinar si los métodos geofísicos utilizados permitieron detectar anomalías sobre las 12 fosas monitoreadas durante el periodo de estudio. Así mismo, evaluar si el comportamiento de las variables ambientales tuvo incidencia en el éxito o no de los objetivos enterrados y comparar con experimentos similares en el contexto internacional.

Esta es la primera investigación que se realiza en el tema con un diseño experimental no usual en dos laboratorios experimentales ubicados en medioambientes diferentes, tal como fue descrito en el

numeral 3.2. Lo anterior con el fin de evaluar las respuestas por parte de los objetos enterrados a los métodos geofísicos en condiciones particulares como, por ejemplo, haber construido fosas a ~ 1,20 metros de profundidad, donde se inhumaron restos óseos incinerados y se simuló un decapitado. Estos resultados servirían para orientar investigaciones de los equipos de búsqueda geoforenses en países ubicados en la zona intertropical.

Los resultados del uso de métodos geofísicos para detectar fosas resultaron favorables para ser ensayados en casos reales, ya que permitirían con alta probabilidad mejorar el éxito de las comisiones judiciales que hoy se realizan en el país, ya que los grupos de búsqueda y exhumación de personas desaparecidas reportan encontrar fosas en solo una de cada 10 salidas a campo, según lo manifestado por el director nacional especializado de Justicia Transicional de la Fiscalía General de la Nación, Carlos Fidel Villamil, a Noticias Caracol de Colombia el 16 de julio de 2015.

Lo anterior da paso a considerar que el uso de la geofísica forense con la tecnología que se requiere, permitiría una reducción de tiempo y costos en la prospección. En una tabla comparativa que consideró el tamaño de área, tiempo y precio de los equipos con fines forenses, elaborada en el Reino Unido, resultó evidente que usar tecnología podría permitir un éxito superior al 90 %, muy por encima al logrado de forma manual (Jamie Pringle, material no publicado). Sin embargo, es necesario considerar la logística, por cuanto habría limitantes en algunas zonas geográficas de difícil acceso en las cuales, por ejemplo, desplazar un georradar sería complicado.

## 5.2 Comparación de los métodos geofísicos utilizados para determinar las anomalías

### 5.2.1 GPR

En el área rural de la sabana de Bogotá, los perfiles 2D obtenidos con la antena de frecuencia 250 MHz durante las primeras 38 semanas (figura 4-5) permitieron observar remoción del terreno donde se construyeron las fosas a ~ 0,80 metros de profundidad; sin embargo, no sucedió lo mismo con las imágenes de las fosas a ~ 1,20 metros, donde se hizo más difícil ver las alteraciones. En ninguno de los casos se marcó una típica reflexión, como se esperaría, al menos de las fosas que contenían los cerdos; el procesamiento realizado para ver las fosas en imágenes 3D sí permitió identificar en la semana 4 (figura 4-8a), siete de las ocho fosas y la otra fue parcial; no obstante, en las mediciones posteriores fue imposible distinguir las tumbas más profundas, como también ha sucedido en otros estudios controlados (Schultz & Martin, 2012; Pringle *et al.*, 2012c); la excepción fue para las fosas construidas a ~ 0,80 metros en las semanas 19 y 22, donde sí se pudieron divisar.

Los datos tomados con la misma frecuencia de 250 MHz, mostraron otra vez un resultado parcial satisfactorio para las semanas 42, 46, 50, 54 y 66 (figura 4-6); la única excepción fue la semana 63, en relación con las fosas hechas a ~ 0,80 metros. Los resultados de las más profundas también mejoraron pero en menor proporción, ya que solo fue positivo en las semanas 42, 46, 50 y 66 (figura 4-7).

El inicio del uso de la antena de frecuencia 500 MHz a partir de la semana 42 mostró una detección parcial en un comienzo para las fosas de ~ 0,80 metros y se incrementó de forma satisfactoria en las siguientes semanas (figura 4-6); sin embargo, en las tumbas de ~ 1,20 metros el éxito fue menor (figura 4-7).

Debido a que los resultados satisfactorios fueron parciales, se hizo el procesamiento en 3D y se observó otra vez que, para la frecuencia de 250 MHz, las semanas 50, 63 y 66 no permitieron detectar las fosas de ~ 1,20 metros, mientras las de ~ 0,80 sí tuvieron una respuesta satisfactoria. Con respecto a la antena de 500 MHz, sí hubo una mejoría para la detección de las fosas más profundas y se mantuvo en términos generales con buena respuesta para las más superficiales.

Por todo lo anterior, es importante tener presente como posibles causas para lo sucedido, que el suelo de las fosas más profundas tenía desde un año antes de construir las tumbas, en su parte superficial, un exceso de material orgánico compuesto por estiércol de gallinaza, conocido también como “gallinaza”, que percola en el suelo y aporta mayor humedad y un color más oscuro en el costado sur (figura 3-1c). Esto sería consistente con la desventaja que tiene el georradar en terrenos con exceso de humedad y más aún si hay tendencia a una textura franco arcillosa (tabla 4-1), como fue el caso de la fosa simulada con el cerdo (A2).

También hay que considerar que en el caso de las fosas con los huesos incinerados y con simulados decapitados (D1/D2 en figura 3-3), pudo afectar la detección el que fueran objetivos muy pequeños y quizás un contraste de permitividad eléctrica muy bajo con respecto al suelo que los rodeaba.

En la zona semirural de los Llanos Orientales, el uso del GPR en la identificación de las fosas, tanto con la antena de 250 MHz como con la de 500 MHz, fue exitoso durante todo el periodo de estudio; sin embargo, en los objetivos con restos óseos y la tumba control, se tuvieron imágenes con fuertes reflexiones horizontales, mientras que donde se enterró el cerdo A3 hubo radargramas con la típica reflexión hiperbólica. La respuesta positiva estaría relacionada con el terreno seco. Resultados satisfactorios también se han reportado en estudios controlados, tanto en Estados Unidos (Schultz *et al.*, 2006; Schultz, 2008; Schultz & Martin, 2011; Schultz & Martin, 2012) como en Europa (Pringle *et al.*, 2008; Pringle *et al.*, 2012c).

### **5.2.2 Susceptibilidad magnética**

En el área rural los resultados fueron variables; hubo mediciones con detección satisfactoria para las ocho fosas, como las observadas en las semanas 52 y 78 (figura 4-12a,d), otros muy aceptables como en las semanas 82, 86, 90, 99 y 103 (figura 4-13), mientras que algunos fueron pobres, como en las semanas 68 y 74 (figura 4-12b,c). La respuesta de los objetivos a la susceptibilidad fue similar en su respuesta geofísica, ya que tuvieron una clara tendencia a presentar anomalías bajas con valores mínimos de 2.242 PPM y -4.198 PPM para las semanas 52 y 78, respectivamente, que fueron exitosas en la identificación.

Hubo una ligera mejor detección de la susceptibilidad en las fosas menos profundas, sobre todo en la D1, que contiene algunos huesos quemados y otros pocos que simulan un decapitado (figura 3-2), cumpliéndose lo supuesto en Molina *et al.*, (2015) donde se manifestó que tal vez métodos

geofísicos magnéticos podrían ser útiles para detectar restos óseos quemados. Esto sugiere que los métodos geofísicos magnéticos pueden detectar restos humanos quemados (Linford, 2004); y en Pringle *et al.*, (2014) también se mostró que la susceptibilidad magnética fue una buena técnica para detectar varios objetivos forenses simulados.

Los resultados de esta propiedad física también fueron mixtos en la zona semirural. La detección exitosa en las cuatro fosas se pudo apreciar en la semana 13 con anomalías bajas y un valor mínimo de 2.358 PPM en el cerdo (A3) y control (B3), en contraste con el esqueleto (C3) y quemados (D3), cuyas anomalías fueron altas y su valor máximo fue 3.584 PPM (figura 4-14d); algo similar sucedió en la semana 30 (figura 4-15d), aunque las anomalías para el cerdo (A3) y quemado (D3) se invirtieron con respecto a la semana 13, el esqueleto (C3) mantuvo su anomalía alta y la fosa control (B3) mostró una ligera combinación de ambas, la primera muy aceptable en algunas mediciones como la 5, 21 y 38 (figuras 4-14b, 4-15b y 4-16b), y pobre respuesta en la semana 47 (figura 4-16d).

Lo encontrado con esta propiedad física en esta investigación es similar a la variabilidad en los resultados de experimentos controlados que han utilizado susceptibilidad magnética (Juerges *et al.*, 2010). En casos reales relacionados con fosas arqueológicas se ha reportado éxito (Linford, 2004). En la literatura se mencionan estudios con equipos marca Geonics EM-31, como el realizado en Jordania para localizar entierros y tumbas (Frohlich & Lancaster, 1986), pero no se encontraron con aplicación forense experimentando con el Profiler 400 aquí utilizado, que se puede considerar dio un buen resultado en esta investigación con la frecuencia de 15.000 Hz, que es la más superficial y mostró anomalías en un 69 % de las fosas; el porcentaje restante está dividido entre anomalías medias y ausentes.

De otra parte, un aspecto a considerar como posible motivo para que en algunas mediciones las anomalías quedaran ligeramente corridas con respecto al objetivo, pudo ser, que el paso de 0,50 metros del operador, programado en la PDA, no fue constante. Lo anterior, se puede relacionar con la clasificación que se hizo de las respuestas geofísicas (tabla 4-3), de forma puntual, con los círculos color gris. Este mismo aspecto aplica para la conductividad, ya que, los datos fueron adquiridos de forma simultánea.

### 5.2.3 Conductividad eléctrica

Durante todo el periodo de estudio en la zona rural, los valores de conductividad tendieron a ser altos sobre las fosas simuladas; los valores máximos oscilaron entre 1.540 PPM y 3.301 PPM y la detección fue pobre con una esporádica excepción durante la semana 82 en la profundidad de ~ 0,80 metros, donde se presentaron anomalías bajas con un valor mínimo de 367 PPM en las fosas del cerdo (A1) y control (B1), mientras en la que tenía quemados (D1) la anomalía fue alta, con un valor máximo de 2.381 PPM, y la que contenía el esqueleto (C1), a pesar de tener una muy sutil tendencia a ser alta, no fue definida (figura 4-17).

En la zona semirural hubo un resultado mixto a esta propiedad física, por cuanto se pudo detectar durante el periodo de estudio la tendencia de una baja anomalía sobre la fosa del cerdo (A3), con valores mínimos entre -122 PPM y -1.448 PPM, así como también fue detectada en la mayoría de mediciones la fosa con el esqueleto (C3), que presentó anomalías bajas con valores mínimos entre -122 PPM y -198 PPM para semanas como la 17, 21, 30 (figura 4-20), y altas como en la 38, con un valor máximo de 1.056 PPM (figura 4-21). Para las otras dos fosas las anomalías fueron mixtas, sin embargo, la identificación solo fue algunas veces, en la control (B3) y huesos quemados con decapitado (D3), tal como ha sucedido en otras investigaciones de entierros individuales (Reynolds, 2011; Dick *et al.*, 2015), en contraste con estudios que han utilizado esta técnica con éxito (Bigman, 2012).

Es importante tener presente que la máxima respuesta siempre estará sobre el objeto (Witten, 2006), la cual depende del tipo de suelo, textura, humedad y temperatura (CEN/WS 059, 2011). De igual manera, que el tamaño, forma, orientación y conductividad del objeto es importante para la respuesta que da el equipo EMI en sus dos componentes *in phase* (susceptibilidad) y *quadratura* (conductividad), las cuales pueden tener un comportamiento entre ellas similar o diferente (Witten, 2006); este último fue el que se presentó, ya que mientras hubo una buena tendencia para detectar las fosas *in phase*, la *quadratura* no fue satisfactoria en los resultados, quizás porque los objetivos no son conductores, con excepción de los proyectiles enterrados con el esqueleto (C1 en figura 3-3d), y los cerdos (A1/A2) que sí podrían haber manifestado respuesta satisfactoria por los fluidos en su proceso de descomposición; sin embargo, esa respuesta fue débil, tal vez por estar cubiertos medio cuerpo o porque la etapa de licuefacción en el proceso de descomposición ya pasó para el momento de la toma de datos en el caso de la zona rural (un año después); sin embargo, debido a la profundidad, humedad y temperatura del área de estudio, es muy probable que ese tiempo haya



variado. Además, en experimentos para medir conductividad en descomposición de cerdos se encontró que hay un aumento durante el primer año, que comienza a disminuir en el segundo año y finaliza en el tercero (Pringle *et al.*, 2012c); lo reportado fue similar para los primeros 12 meses en el área semirural, en la cual el cerdo (A3) registró buenos resultados para la conductividad (tabla 4-5).

#### 5.2.4 Resistividad eléctrica

En la zona rural hubo una diferencia marcada entre las fosas simuladas a ~ 0,80 metros que presentaron mayor resistividad aparente con respecto a las construidas a ~ 1,20 metros durante el periodo de estudio (figuras 4-22, 4-23 y 4-24), en especial con las tumbas del esqueleto (C2) y quemados (D2) que presentaron anomalías bajas. La diferencia de valores no incidió para que todos los objetivos fueran detectados.

La diferencia de resistividades aparentes entre las fosas de profundidad ~ 0,80 y ~ 1,20 metros es consistente, por cuanto, las segundas fueron simuladas sobre un suelo que durante un año antes de iniciar la investigación tuvo gallinaza, lo cual generó mayor humedad en el suelo y, por lo tanto, habría existido mayor conductividad y los valores de resistividad serían menores.

La respuesta a este método geofísico también fue muy satisfactoria en la zona semirural para las fosas a profundidad de 0,50 metros con el cerdo (A3) al presentar anomalías bajas durante todo el estudio, con valores mínimos entre 226  $\Omega$ .m y 851  $\Omega$ .m y promedio de 409  $\Omega$ .m, mientras para el esqueleto (C3) las anomalías fueron altas también durante el tiempo que duró el experimento, con valores entre 403  $\Omega$ .m y 2.881  $\Omega$ .m, con promedio de 993  $\Omega$ .m. En contraste, la fosa control (B3) en ninguna medición pudo ser detectada (figuras 4-25 y 4-26). En el caso de la fosa con huesos quemados y un decapitado (D3), los resultados fueron mixtos al no ser detectada en semanas como la 9 y 17 (figura 4-25), pero sí en semanas como la 34, 43 y 47 (figura 4-26).

Un aspecto importante para mostrar es el contraste con experimentos anteriores, donde las fosas vacías no fueron detectadas (Jervis, 2010), pero en el laboratorio experimental de la zona rural de esta investigación los resultados indicaron que sí se pudo distinguir con anomalías altas, tanto en la fosa control (B1) como en la (B2). Los estudios de resistividad eléctrica aparente mostraron ser útiles como otros realizados en Europa (Pringle *et al.*, 2012c).

### 5.3 Efectividad de los métodos

El total de los resultados obtenidos de las respuestas geofísicas a la detección de las fosas aparece resumido en las tablas 4-4 y 4-5, los cuales se obtuvieron a través de la metodología descrita en el capítulo 3. Para definir la efectividad de los métodos se debe tener presente la clasificación que aparece en la tabla 4-3 y así interpretar y llevar a valores de porcentaje cada una de las mediciones exitosas (círculos negros), que permitieron que cada método indicara, a través de una anomalía, la detección de la fosa. Sin embargo, los valores que se darán corresponden al promedio porcentual de un mismo método exitoso en todas las fosas.

Los resultados de cada método (tabla 5-1) se observan semicuantificados en porcentaje para cada una de las fosas del Centro Agropecuario Marengo. Con base en lo anterior, el método más exitoso fue la resistividad, con un valor mayor al 87 %, seguido de la susceptibilidad mayor a 70 %; el georradar tuvo un resultado negativo para ambas antenas, la de 250 MHz con un porcentaje de éxito de 47 % y la de 500 MHz de 40 %; por último, la conductividad, con un resultado de 22 %.

**Tabla 5-1:** Promedio porcentual del éxito de cada uno de los métodos geofísicos en la detección de las fosas en la zona rural.

Método	Resultado	Cerdo		Control		Esqueleto		Quemado y decapitado		
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	
GPR	250 MHz	●	66,7	50,0	58,3	33,3	75,0	25,0	58,3	16,7
		●	25,0	16,7	16,7	33,3	16,7	41,7	16,7	33,3
		○	8,3	33,3	25,0	33,3	8,3	33,3	25,0	50,0
	500 MHz	●	60,0	40,0	60,0	40,0	60,0	0,0	60,0	0,0
		●	0,0	40,0	40,0	40,0	40,0	60,0	40,0	40,0
		○	40,0	20,0	0,0	20,0	0,0	40,0	0,0	60,0
Resistividad	●	100,0	100,0	72,7	90,9	72,7	81,8	90,9	90,9	
	●	0,0	0,0	27,3	9,1	18,2	9,1	0,0	9,1	
	○	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	9,1	0,0	0,0	
Conductividad	●	30,0	50,0	60,0	20,0	0,0	0,0	0,0	20,0	
	●	60,0	40,0	30,0	10,0	50,0	50,0	20,0	0,0	
	○	10,0	10,0	10,0	70,0	50,0	50,0	80,0	80,0	
Susceptibilidad	●	60,0	80,0	80,0	70,0	70,0	70,0	90,0	40,0	
	●	40,0	10,0	20,0	10,0	10,0	10,0	0,0	30,0	
	○	0,0	10,0	0,0	20,0	20,0	20,0	10,0	30,0	

Con respecto al laboratorio de la Granja Experimental Barcelona, en los resultados (tabla 5-2) se ve que el GPR resultó ser el más efectivo, con un porcentaje mayor a 90 % para la antena de 250 MHz, mayor a 96 para la frecuencia de 500 MHz, la susceptibilidad mayor a 70 %, luego la conductividad con 64 %, y por último la resistividad con valores mayores a 61 %; sin embargo, este último método no detectó la fosa control, al igual que lo reportado por Jervis (2010).

Al analizar los resultados en conjunto para los dos ambientes, rural y semirural, se tiene que los métodos más efectivos fueron la resistividad y la susceptibilidad, con valores de 70 %, seguidos del georradar con 69 % y 68 % para las antenas con frecuencia de 250 y 500 MHz, respectivamente, y por último la conductividad, con un 43 %.

**Tabla 5-2:** Porcentaje de éxito de cada uno de los métodos geofísicos en la detección de las fosas en la zona semirural.

Método		Resultado	Cerdo	Control	Esqueleto	Quemado
			A3	B3	C3	D3
GPR	250 MHz	●	87,5	87,5	87,5	100,0
		●	12,5	12,5	12,5	0,0
		○	0,0	0,0	0,0	0,0
	500 MHz	●	87,5	100,0	100,0	100,0
		●	12,5	0,0	0,0	0,0
		○	0,0	0,0	0,0	0,0
Resistividad		●	100,0	0,0	100,0	44,4
		●	0,0	44,4	0,0	22,2
		○	0,0	55,6	0,0	33,3
Conductividad		●	83,3	41,7	66,7	66,7
		●	8,3	33,3	25,0	16,7
		○	8,3	25,0	8,3	16,7
Susceptibilidad		●	75,0	50,0	75,0	83,3
		●	25,0	50,0	16,7	16,7
		○	0,0	0,0	8,3	0,0

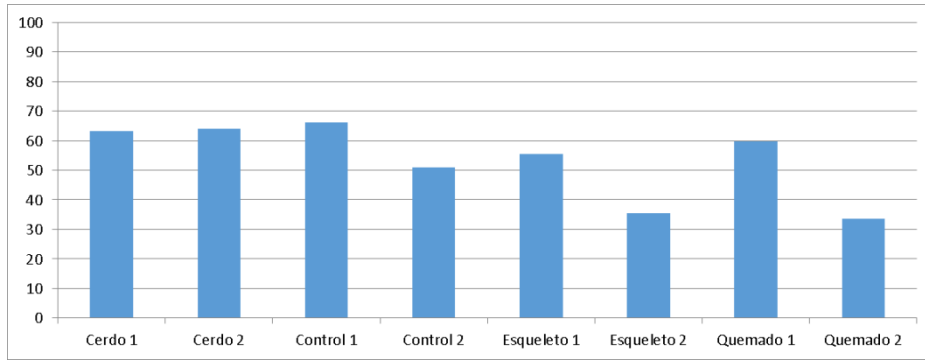
### 5.4 Identificación y comparación de las fosas simuladas en las áreas de estudio

Con base en el numeral 5.2, en este se puede detallar la información del éxito o no de las fosas que fueron identificadas y así poder comparar todas entre sí, a partir de las mediciones donde las anomalías bajas o altas permitieron detectar con certeza las fosas, es decir, las que aparecen solo con círculo negro. Para ello se sacaron los porcentajes de cada laboratorio experimental.

En el área rural del Centro Agropecuario Marengo, la fosa mejor detectada fue la de control B1, seguida del cerdo A2 y cerdo A1; las tres tuvieron valores muy cercanos entre sí y oscilaron desde 66 % hasta 63 %, respectivamente. Luego siguieron el quemado y decapitado D1, esqueleto C1, control B2, esqueleto C2 y quemado decapitado D2 (figura 5-1). Lo anterior permite mostrar que fueron detectadas con mayor facilidad las fosas que estaban a 0,80 metros de profundidad.

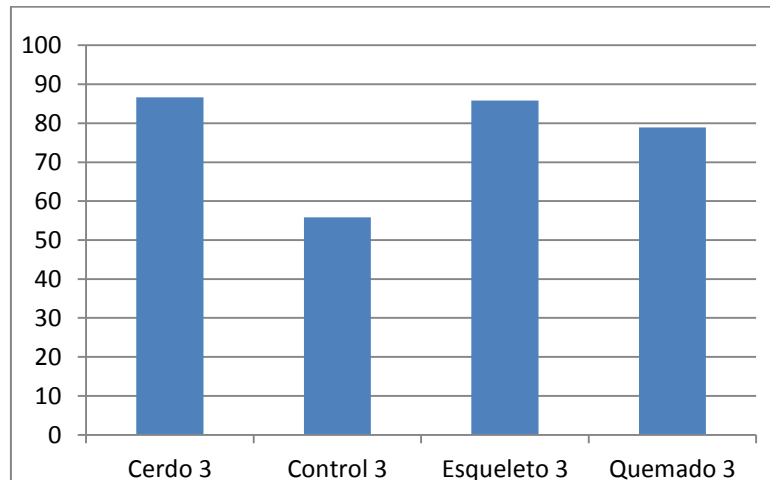
También se puede decir que los métodos no solo detectan los objetivos sino la perturbación del terreno, por cuanto la fosa control B1 que estuvo vacía fue la que mejor se identificó.

**Figura 5-1:** Histograma con la semicuantificación de la efectividad de cada método en el ambiente rural del Centro Agropecuario Marengo.



En el área semirural de la Granja Experimental Barcelona, el mejor resultado fue para la fosa del cerdo A3 con un porcentaje mayor a 86 %, seguido muy de cerca de la fosa con el esqueleto C3, que tuvo un porcentaje mayor a 85 %, luego la tumba del quemado y decapitado D3 con un 78 % y por último la fosa control B3, con un 55 % (figura 5-2).

**Figura 5-2:** Histograma con la semicuantificación de la efectividad de cada método en el ambiente semirural de la Granja Experimental Barcelona.



Al comparar los resultados de los dos laboratorios experimentales se aprecia que en la zona semirural la respuesta a los métodos geofísicos fue satisfactoria, mientras en la zona rural fue aceptable. En ambos lugares, las fosas con los cerdos fueron las de mejor resultado. También se

aprecia que de las tres profundidades, la que mejor respuesta dio al estudio fue la más superficial, es decir, la de 0,50 metros, seguida por la de 0,80 metros, y la más profunda, de 1,20 metros.

## **5.5 Relación de las variables suelo, pluviosidad, temperatura y profundidad, con la respuesta de los métodos geofísicos para localizar fosas**

### **5.5.1 Suelo**

La textura del suelo en la zona rural con predominio franco arcilloso y franco limoso, puede explicar por qué no se pudieron apreciar de forma clara las fosas, puesto que no siempre el método del GPR ha sido exitoso (Nobes, 2000), y cuando sí ha funcionado (France, 1992; Schultz, 2006), por lo general el suelo es arenoso o tiene predominio de este tipo de partícula. Además, se encontraron algunas diferencias en la textura de los horizontes entre las fosas construidas a ~ 0,80 metros y las de ~ 1,20 metros (tabla 4-1). Para el caso de las fosas simuladas en zona semirural, la textura fue franco arcillosa y arcillosa; sin embargo, en esta oportunidad el georradar sí tuvo muy buenos resultados, lo que indicaría que la diferencia estaría dada en que las arcillas de la zona rural estaban húmedas y las del área semirural secas, de tal forma que en estas últimas hay condiciones aceptables para que la señal del georradar penetre.

Lo anterior se relaciona también con la conductividad, que en terrenos de arcillas húmedas presenta una correlación significativa (Peralta *et al.*, 2012), así como fue el predominio en las fosas a ~ 1,20 metros debido a la presencia de gallinaza, como se dijo en 5.2.1, manifiesta anomalías positivas y a su vez genera menor probabilidad de éxito con el georradar al dificultar la penetración de la señal, de ahí que la tendencia en los valores altos de conductividad ya mencionados en 3.5.4.1.2 para la zona rural, también explicarían por qué no fue exitoso el GPR en este medio ambiente, mientras que en el área semirural la conductividad tuvo valores no solo altos sino también bajos, que hicieron posible la detección de las fosas con el georradar, y a su vez también permitió una ligera mejoría en la respuesta de las fosas a la conductividad con la textura franco arcillosa y arcillosa, pero no húmeda.

La resistividad tiene una relación directa con la textura, puesto que hay una dependencia de la mayor o menor cantidad de poros que tenga el suelo. En la zona rural la presencia de arcilla y limo hace que el terreno presente resistividades con promedio de valores máximos de 124  $\Omega$ .m, que son

bajos comparados con el área semirural que tuvo el promedio de los valores máximos de resistividad aparente en 993  $\Omega.m$  durante el periodo de estudio, con una textura de tendencia arcillosa y seca, resultados que son consistentes.

### **5.5.2 Pluviosidad y Temperatura**

En la zona rural, la estación meteorológica del Centro de Investigación Corpoica-Ideam, mostró que la pluviosidad durante todo el periodo del estudio fue muy baja, con semanas donde no llovió, como la 42, 59, 82 y 90; y cuando hubo precipitaciones, el promedio no supero los 3 mm, como en las semanas 1-19, 33, 46, 52, 55, 63, 68, 78, 86, 94, 99 y 103. La excepción fue la semana 38 en la cual se reporto lluvias de 10 mm. La temperatura para el mismo lugar y periodo de tiempo se mantuvo estable, ya que sólo tuvo una variación de 2 °C (figura 4-3).

Lo anterior, indica que hubo una gran estabilidad en estos parámetros meteorológicos, por lo tanto, y continuando con la integración, relación y discusión de los resultados, se puede decir que no se aprecia una incidencia directa de estas dos variables en el éxito de la resistividad para detectar las fosas, de la respuesta no satisfactoria de la conductiividad durante el monitoreo, de las perturbaciones aceptables sobre los objetvios con el georadar, y de los resultados prometedores de la susceptibilidad magnética.

En el caso de la zona semirural, la estación meteorológica de Unillanos-Ideam, registró una temperatura con tendencia estable durante todo el periodo del experimento, con variación de 3 °C; mientras la precipitación sí tuvo fuertes contrastes, con semanas donde no llovió, como la 13 y 21, y otras con pluviosidad promedio de 15 mm, como la 5 y 38 (figura 4-4); esto último sí tuvo incidencia en los datos recolectados de resistividad, unos altos y otros bajos respectivamente, lo cual es consistente; sin embargo, no afectaron la detección de las fosas con el cerdo (A3) y esqueleto (C3). Tampoco alteró la detección de la fosa con los huesos quemados (D3) en las semanas que fue posible, en las cuales no hubo un patrón de mayor o menor pluviosidad para la detección, es decir, la anomalía se presentó sobre este objetivo tanto en periodo seco (semana 21), como en periodo lluvioso (semana 34).

Los resultados del georadar tampoco se vieron afectados porque siempre fueron exitosos. La susceptibilidad magnética y la conductividad también tuvieron buenos resultados que no se vieron afectados por los fuertes cambios entre el periodo seco y lluvioso.

### 5.5.3 Profundidad

La construcción de las 12 fosas simuladas a tres profundidades permitió detectar diferencias en las respuestas de los objetos enterrados a los cuatro métodos geofísicos aplicados. Así es como las cavadas a ~ 0,50 metros dieron en general mejores resultados que las hechas a ~ 0,80 metros y ~ 1,20 metros. Las menos profundas fueron muy bien detectadas con el GPR, tanto con la frecuencia de 250 MHz como con la de 500 MHz. En las de mediana profundidad fue posible detectarlas solo en algunas mediciones, mientras que las más profundas fueron las de mayor dificultad para ser identificadas. De acuerdo con lo anterior se puede afirmar que a menor profundidad mejor respuesta.

Si tenemos presentes las características del suelo ya mencionadas en 3.5.1 y 5.4.1 se pueden entender las posibles causas por las cuales el georradar no tuvo buena respuesta en las fosas más profundas; sin embargo, también se podría contemplar abrir más la ventana de tiempo para pretender alcanzar una mayor profundidad de las ondas electromagnéticas.

En la medición de la susceptibilidad magnética como propiedad física en los dos laboratorios experimentales, la respuesta de los objetivos al método fue similar para las tres profundidades respecto a los resultados mixtos dados durante el período de estudio, pero sí hubo diferencia en relación con el tipo de anomalía, de forma concreta para el caso de las fosas menos profundas con el esqueleto (C3) y los huesos quemados y decapitado (D3), que fueron positivas, y estos mismos objetivos pero en profundidades de ~ 0,80 y ~ 1,20 metros fueron negativas, lo cual indicaría un cambio en las variables analizadas.

También es importante mencionar la diferencia en la detección con la susceptibilidad magnética entre la fosa D1 y la D2, ya que a pesar de que tenían el mismo contenido de huesos incinerados y la simulación de un decapitado, la segunda fue la menos detectada, lo cual indicaría que la profundidad sí tuvo incidencia, relacionada, a su vez con el tamaño del objetivo, ya que las fosas C1/C2 con los esqueletos, así como las fosas con los cerdos A1/A2 fueron detectadas de forma similar.

La conductividad, a pesar de que fue un método no satisfactorio en términos generales, tuvo un mejor comportamiento en las fosas menos profundas con respecto a las más profundas, ya que en el primer caso se logró detectar —en algunas mediciones— los objetivos, mientras en el segundo

caso fue casi nula la respuesta, sobre todo cuando se esperaba que los fluidos producto de la descomposición de los cerdos marcaran anomalías, lo que solo sucedió en la fosa del cerdo A3, es decir, la menos profunda. Lo anterior permitiría indicar que es muy probable que los líquidos muy profundos no se alcancen a detectar, ya que, a 0,50 metros también fue posible en el experimento de Pringle *et al.*, (2012c).

La resistividad aparente dió el mejor resultado en todas las profundidades, ya que permitió detectar con éxito 10 de las 12 fosas simuladas; la excepción fueron dos de las menos profundas: los huesos quemados y el decapitado (D3), que tuvo resultados mixtos, y la de control (C3), que no fue posible identificar durante el periodo de estudio.

#### **5.5.4 Vegetación**

Esta es una variable adicional que se quiso tener en cuenta en el desarrollo de la investigación, porque es importante en el contexto de la búsqueda de fosas, y en la prospección básica que se debe hacer en campo, pero nunca estuvo contemplada en los objetivos porque aún no se conoce una relación directa con la respuesta a los métodos geofísicos, o al menos no se encontró literatura al respecto; sin embargo, si analizamos que para el crecimiento de vegetación se requiere, entre otros elementos, humedad y aireación en el suelo, sí se podría pensar en una relación con el método de resistividad eléctrica y conductividad, donde la primera disminuye y la segunda aumenta cuando existe presencia de vegetación sobre las fosas.

Para el caso del laboratorio experimental en la zona rural, la vegetación marcó diferencia entre los espacios donde se hicieron las fosas y donde no se alteró el terreno. La planta clasificada como *Raphanus raphanistrum L.*, cuyo nombre popular es “rábano silvestre”, solo creció al comienzo sobre las fosas simuladas a ~ 0,80 metros en los primeros meses y luego sobre las que estaban a profundidad de ~ 1,20 metros; en este es muy posible que haya influido la aireación de las fosas en el momento de ser excavadas. En el terreno sin alterar creció el pasto kikuyo, típico de la zona (figura 4-1).

En el laboratorio experimental en zona semirural crecieron plantas clasificadas como *Malvaceae* y *Petiveria*; sin embargo, demoraron más tiempo que las de la zona rural, quizás por las condiciones más secas del lugar donde se hizo el montaje del diseño experimental, ya que un mes después de realizado se inició el periodo no lluvioso (figura 4-2).



## 5.6 Metodología del trabajo de campo con los métodos geofísicos

La metodología llevada a cabo con el GPR y las mediciones de las propiedades físicas de susceptibilidad magnética, conductividad y resistividad para determinar la respuesta geofísica de las fosas simuladas a través de anomalías durante todo el tiempo del experimento resultó válida, tanto por los resultados obtenidos como por ser funcionales para tomar decisiones en trabajo de campo la mayoría de situaciones.

La calibración de los equipos como parte de buenas prácticas de calidad —un requisito importante y necesario—, se tuvo en cuenta en primera instancia, es decir, antes de iniciar su uso con la programación del *software* para la adquisición de los datos.

La información que se obtenía en campo con el GPR a través de los registros 2D o radargramas, permitió observar si había alteración en el terreno con la presencia de reflexiones horizontales o si, por el contrario, los horizontes del suelo se mantenían sin cambio; también se buscó determinar hipérbolas típicas de un entierro en el momento en el que se pasaba el georradar por encima de las fosas que tenían cerdos.

El uso del Profiler 400 resultó ser práctico, ya que permitió medir de forma simultánea las propiedades físicas de conductividad y susceptibilidad; además, tiene un *software* amigable y es un equipo liviano, fácil de llevar a una comisión judicial. Mostró también una ventaja similar al GPR: facilita tomar decisiones en el terreno, pues la pantalla de la PDA registra los valores en PPM de las dos propiedades, medidas de tal forma que se pueden observar sus diferencias; sin embargo, lo más importante fue que al finalizar la toma completa de datos se pudo mirar en el computador portátil con el *software* MagMap 2000, las anomalías positivas y negativas detectadas por el equipo, así que se obtuvo información de gran utilidad, sobre todo en los resultados de la zona semirural, donde se presentaron anomalías sobre las fosas para susceptibilidad y conductividad.

El equipo de geoelectrica Abem Terrameter 1000 permitió medir la resistividad aparente con el uso de electrodos en el suelo, de forma exitosa, a pesar de que no es el instrumento usual para la toma de datos con fines forenses, ya que el tiempo para la adquisición de la información es el doble de lo que sería con un RM85 Resistence Meter (Geoscan, 2015). En cuanto a logística, ambos son prácticos para hacer prospección geofísica y el peso es aceptable. La desventaja es que los datos

hay que digitarlos en una hoja de cálculo para luego ser procesados; lo cual no sucedería si se pudiera contar con un equipo de tomografía para interpretar y tomar decisiones en el terreno.

En varias de las 38 salidas de campo que se realizaron, se tomaron los tiempos empleados en la adquisición de los datos con cada uno de los equipos (tabla 5-3). Esta información es una parte importante de la metodología que se recomienda tener en cuenta durante la etapa previa a la salida de campo, la cual también necesita tener presente las ventajas y desventajas de cada equipo (tabla 2-2, y además el conocimiento de otras disciplinas de las geociencias. Por lo anterior, en el Anexo B se propone integrar toda la geología forense en la búsqueda de personas desaparecidas, de tal forma que la metodología desarrollada y propuesta en esta investigación sea vista en contexto.

De forma complementaria, los costos aproximados por kilómetro lineal (tabla 5-3), están estimados cuando se solicita el servicio a una empresa privada, esta aclaración es importante, ya que, si el sistema judicial colombiano, y, o, las organizaciones no gubernamentales deciden comprar la tecnología requerida y contratar personal de planta, esos valores se reducen ostensiblemente.

**Tabla 5-3:** Áreas, tiempos, y costos aproximados para los métodos de prospección geofísica utilizados.

<b>Método</b>	<b>Área</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Costo por km lineal</b>
GPR	100 m <sup>2</sup> con intervalos de 0,25 m	1 hora 20 minutos	\$2.700.000
Magnético. Susceptibilidad magnética	100 m lineales con intervalos cada 0,50 m	35 minutos	\$1.800.000
Electromagnetismo (EM). Conductividad			
Resistividad eléctrica	100 m lineales con intervalos cada 0,25 m	2 horas 30 minutos (con Geoscan Resistivity Meter, 1 hora 15 minutos)	\$2.400.000

# Capítulo 6

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las principales conclusiones del trabajo de investigación; se inicia con las obtenidas a partir de la metodología llevada a cabo en los dos laboratorios experimentales, luego se muestran las referentes a las anomalías detectadas como respuestas de los objetivos enterrados, y por último, las que corresponden a las variables ambientales necesarias para evaluar el contexto de las propiedades físicas medidas. Finalmente se hacen unas recomendaciones.

### 6.1 Conclusiones

Se simularon 12 fosas clandestinas con cuerpos inhumados y objetos enterrados, en dos laboratorios experimentales ubicados en dos sitios de Colombia, con ambientes diferentes, que permitieron obtener una respuesta geofísica a partir de las variables de profundidad de la tumba, tiempo de enterramiento, pluviosidad y textura del suelo, y también, dar respuesta positiva a la hipótesis planteada.

Se estableció una metodología apropiada para el procedimiento de trabajo de campo con un georradar, un equipo de electromagnetismo y uno de geoelectrónica en la búsqueda de fosas con restos óseos en Colombia; sin embargo, puede ser transversal a otros países de la zona intertropical que tengan medioambientes similares a los reportados en esta investigación.

Sobre la base de los resultados obtenidos mediante la aplicación de distintas técnicas geofísicas e interpretaciones realizadas, se concluye que estas son una potente herramienta para la ubicación de sitios de enterramientos clandestinos de personas; y la aplicación de forma integral de las mismas, en distintos casos, aumentará sustancialmente la posibilidad de hallazgos en Colombia

Se establecieron tiempos aproximados para la prospección de terrenos en búsqueda de fosas a partir de la metodología establecida y llevada a cabo en el monitoreo de las 12 fosas, donde se realizó la aplicación de los métodos geofísicos con GPR, y la medición de susceptibilidad magnética, conductividad y resistividad eléctrica.

Las imágenes obtenidas con el GPR en 2D en ambos laboratorios experimentales permitieron detectar alteración del terreno en algunas de las fosas construidas, y ver hipérbolas solo en el cerdo enterrado en la zona semirural a 0,50 metros de profundidad.

En la vista de planta de las imágenes 3D realizadas en el área de estudio del ambiente rural, el contorno fue mejor definido en las fosas cavadas a 0,80 metros que en las de 1,20 metros.

La susceptibilidad magnética tuvo resultados mixtos durante todo el periodo del estudio, y detectó fosas en las diferentes mediciones llevadas a cabo, con anomalías negativas y positivas, con predominio de las primeras.

En la susceptibilidad magnética se destacan los buenos resultados para detectar huesos quemados a una profundidad de 0,50 y 0,80 metros, pero no a 1,20 metros.

La resistividad fue el método más exitoso para detectar las fosas en los dos ambientes en que se realizó el experimento, y los valores de resistividad a pesar de ser diferentes, permitieron identificar las fosas durante todo el periodo que duró el monitoreo con anomalías negativas para los cerdos y mixtas para los esqueletos.

Las anomalías que se observaron con los datos de la resistividad no solo detectaron las fosas con los objetivos, sino también la perturbación del suelo, como sucedió con las fosas vacías B1/B2, lo cual fue un resultado diferente a estudios experimentales anteriores.

La conductividad no tuvo resultados satisfactorios en el ambiente rural en que se simularon las fosas; sin embargo, en el área semirural la respuesta fue aceptable, con más anomalías negativas que positivas en las fosas que detectó.

Las técnicas de resistividad, susceptibilidad y GPR, en su orden y con porcentaje de efectividad similar, fueron exitosas en la mayoría de mediciones para detectar las fosas.

En orden de mayor a menor y sin una diferencia significativa entre ellos, los objetivos que presentaron mejores anomalías fueron los cerdos, fosas vacías y esqueletos. Lo anterior difiere de los restos óseos quemados, que tuvieron resultados mixtos.

La textura con arcilla húmeda tuvo incidencia en no permitir detectar de forma clara las fosas simuladas a 1,20 metros con el georradar. Para el caso de resistividad y conductividad hubo consistencia de los resultados con las texturas de los terrenos con predominio de arcilla y limo.

La pluviosidad y temperatura, durante todo el periodo del estudio, no presentaron incidencia en los resultados obtenidos con los métodos geofísicos, con una ligera excepción en los datos de la resistividad en la zona semirural, pero sin alterar el resultado final en la detección.

Las fosas simuladas a menor profundidad, es decir, a 0,50 metros, dieron mejor respuesta a los métodos geofísicos aplicados; les siguen las de 0,80 metros, y por último las de 1,20 metros que fueron las de menos éxito.

La vegetación sirvió para delimitar de forma muy evidente los lugares donde se construyeron las fosas en la zona rural, mientras que en la zona semirural las plantas también crecieron, pero sin marcar los bordes de la tumba.

## **6.2 Recomendaciones**

Aplicar la metodología y resultados de esta investigación en la búsqueda real de personas desaparecidas en Colombia y países intertropicales que tengan condiciones ambientales como las descritas en esta investigación.

Continuar con el monitoreo geofísico a las 12 fosas simuladas para determinar su comportamiento temporal y así tener resultados geofísicos para la búsqueda de personas después de dos años de desaparecidas.

Incluir en nuevas investigaciones con fosas simuladas prendas de uso diario de las personas, tales como cinturones, zapatos, camisas e interiores.

Realizar experimentos similares en otros suelos y ambientes del territorio colombiano, con tamaños de fosas de 0,40 por 0,40 metros, que también son escenarios donde han aparecido personas descuartizadas

Ensayar otros métodos geofísicos que permitan agilizar y tomar decisiones sobre el terreno, entre ellos hacer tomografía, que es rápida y ha dado muy buenos resultados en otras partes.

Incluir en los objetivos de futuras investigaciones en geofísica forense, la aplicación de otras disciplinas de las geociencias necesarias para la búsqueda de personas desaparecidas, relacionadas con el conocimiento en geomorfología, hidrogeología, imágenes satelitales, fotografías aéreas, mecánica de suelos.

Incorporar por parte de los equipos judiciales de exhumación, la metodología aquí propuesta, con la finalidad que se aumente de forma considerable la posibilidad de hallazgo, y así, dar una respuesta más concreta a la justicia, familiares de desaparecidos y organismos de derechos humanos.

## A. Anexo: Especificaciones técnicas de los equipos que se utilizaron durante el monitoreo a las fosas simuladas.

Equipo	Marca	Características técnicas
Georadar	Mala Proex	<p>Las antenas blindadas se usan principalmente para estudios de media o alta resolución. La construcción de estas antenas encaja especialmente en entornos urbanos o lugares con mucho ruido de fondo. Las antenas de MALÁ son modulares, por lo que se adaptan a la electrónica para antenas blindadas, el equipo de arrastre y las ruedas de medición. Esto reduce el costo y las subsiguientes expansiones del equipo.</p> <p>El diseño asegura que la señal sea emitida únicamente de la parte interna e inferior de la antena, la cual está en contacto con el suelo, de esta manera protege al receptor (Ex) de señales externas, como ruido que provengan de direcciones que no sea de la parte inferior interna.</p> <p>Tiene rango de antenas que van desde 100 hasta 1200 MHz.</p>

Equipo	Marca	Características técnicas
Electromagnetismo	GSSI	<p>Tiene un sensor de inducción electromagnética multifrecuencia que permite coleccionar simultáneamente 3 frecuencias. El sistema tiene un ancho de banda de 1000 a 16000 kHz. La salida de los sistemas de datos primarios son los componentes ortogonales (reales e imaginarios, o de <i>in phase</i> y <i>quadratura</i>), de la relación campo de acoplamiento mutuo del campo transmitido al campo inducido en partes por millón (PPM) y la conductividad aparente. Los componentes de <i>in phase</i> y <i>quadratura</i> en el campo secundario inducido, así como la conductividad aparente se recogen y almacenan para cada lectura junto con el tiempo establecido.</p> <p>Tiene un sensor electrónico que controla por <i>wireless bluetooth</i> la comunicación interfase almacenando con los datos la información en una PDA digital Recon 400. Los datos pueden ser coleccionados en modo dipolo vertical (VDM) u horizontal (HDM). El sistema es alimentado por una batería recargable de Li.</p> <p>Instrumento de inducción electromagnética Profiler 400, abrazaderas de montaje para transporte y de mano, PDA con <i>bluetooth</i>, esfera para la pantalla, soporte de montaje para la PDA Recon 400, batería recargable de Li, módulo para batería AA, cable de transferencia de datos USB.</p>
Geoeléctrica	Abem Terraameter SAS 1000	<p>Está equipado con un microprocesador compatible con PC y controlado por cuatro botones. Cada botón está montado en una espiga, fijada en el panel del aparato, y el movimiento del botón se transfiere magnéticamente. Esto asegura un sellado impermeable.</p> <p>El programa permite al usuario especificar en detalle los parámetros de medición, e incluso introducir comentarios en los ficheros de datos.</p> <p>Tiene conectores de comunicación para la serie RS232. También conectores de corriente y potencial en paralelo ubicados en la parte superior de la pantalla.</p> <p>Tiene un canal de salida, conector de batería externa, cable RS 232.</p>



# **B. Anexo: Propuesta metodológica para la búsqueda de personas desaparecidas aplicando geología forense**

## **1. Introducción**

El desarrollo de la investigación que ha sido mostrada de forma detallada y consistente a través de 6 capítulos, permite en esta sección presentar la propuesta metodológica para la búsqueda de personas desaparecidas introduciendo la geofísica forense aplicada al contexto de las demás disciplinas y conocimientos de las geociencias, por cuanto es necesario integrar el conocimiento de varios expertos para llevar a cabo una labor con alta probabilidad de éxito.

Esta propuesta, pretende que la sociedad civil y el sistema judicial colombiano se vean beneficiados al disponer de líneas de investigación útiles para contribuir a resolver parte de la problemática de violación de los Derechos Humanos que ha sucedido a través de varias décadas de conflicto armado en nuestro territorio. Sin embargo, la metodología también tendrá aplicación por parte de cualquier equipo de trabajo judicial en otro país que desee utilizar las geociencias, y en particular la geofísica forense, que está basada en la medición de propiedades físicas de tipo universal.

## **2. Metodología**

Los métodos geofísicos representan una alternativa muy deseable en las investigaciones con fines forenses que requieren encontrar cuerpos y objetos enterrados por cuanto ayudan a tomar decisiones de forma rápida y confiable, algo que se requiere en Colombia donde no son empleados. Es por lo anterior, que se propone introducir el uso de Ciencia y Tecnología en el protocolo de búsqueda de personas desaparecidas lo cual requiere 2 etapas, la primera corresponde a trabajo de escritorio, para revisar la información del caso, identificar el (las) área (s) de búsqueda, evaluar información de sensores remotos, fotografías aéreas, la geomorfología, y los mapas de suelos. La segunda es una fase de campo, donde se inspecciona el lugar, se realiza una prospección básica, se

utilizan los equipos de geofísica con los cuales se adquiere de forma confiable los datos sobre el terreno, y luego, se procesan con software especializado, por último, se procede a interpretar los resultados para tomar decisiones sobre los sitios que presentan las anomalías, y así proceder a excavar o descartar el lugar.

## **2.1 Trabajo de escritorio**

Es la primera fase que se debe realizar antes de ir a campo a buscar la(s) fosa(s), con el fin de tener un mejor resultado en la exploración. Desde el punto de vista teórico, se necesita conocer la información del caso y definir el área de búsqueda, luego de manera práctica, utilizar sensores remotos, analizar la geomorfología y ver los mapas de suelos.

### **2.1.1 Revisión de la información del caso**

Es necesario conocer que información existe sobre los hechos materia de investigación, sobre todo si hay testimonios de familiares y/o victimarios que permitan orientar o ubicar el(los) sitio(s) geográfico(s) y así comenzar a delimitar el (las) área(s). Para este objetivo, se requiere disponer de los procedimientos que se han seguido en la etapa previa por parte de los profesionales en ciencias sociales, y los investigadores judiciales que han recolectado todo el material relacionado con las personas que se van a buscar.

### **2.1.2 Identificación del(as) área(s) de búsqueda**

Se requiere identificar los límites del área de búsqueda. Esto se puede llevar a cabo con trabajo de oficina donde se recolecte a información geológica, de suelos, y la historia del lugar. También es recomendable establecer cuantas personas se van a buscar, y en cuantas fosas están, para lo cual es importante conocer el relato del(os) informante(s) y/o los testimonios de familiares.

Hay que definir si el área es rural, semirural, urbana o de bosque, de tal forma que se pueda evaluar las ventajas y desventajas del uso de tecnología acorde a cada medio ambiente mencionado, lo que a su vez conduce a evitar enmascarar el objetivo de interés.

La búsqueda de fosas en extensas áreas donde no se tiene información oral, requiera hacer una evaluación geocientífica integral de escritorio para luego hacer el reconocimiento del sitio en campo, de tal forma que se defina la estrategia y métodos geofísicos viables de usar.

### **2.1.3 Sensores remotos**

Los métodos de sensores remotos en las investigaciones forenses incluye fotografías aéreas, mapas topográficos, imágenes de satélite, y sistemas de posicionamiento global (GPS) (Brilis *et al.*, 2000; Grip *et al.*, 2000). En Colombia, las fotografías aéreas son de más fácil acceso, de ahí que se pueden usar para identificar las características y/o parches de vegetación inusuales (France *et al.*, 1992; Hunter & Cox, 2005); sedimentos y flúidos causados por los desechos de un cuerpo, asociados a objetos en un lago; e identificar los puntos de acceso a un lugar sospechoso (Ruffell & McKinley, 2008), teniendo en cuenta que objetos pesados rara vez son enterrados a más de 150 metros (Killam, 2004).

La radiación ultravioleta (UV) se utiliza cada vez más en las investigaciones forenses para mapear la madurez de la vegetación, por cuanto esta es más joven sobre el material recién enterrado, que el de las plantas de los alrededores (Ruffell & McKinley, 2008).

Conjuntos de datos de imágenes de satélite son muchas y variadas; por ejemplo, imágenes hiperespectrales han demostrado ser útiles para determinar la ubicación de fosas clandestinas individuales y fosas comunes en áreas de rápido crecimiento de vegetación; además, el cambio de uso del suelo y climas húmedos en Colombia (Ruffell & McKinley, 2008; Equitas, 2010). Áreas de enterramiento sospechoso también se pueden escanear rápidamente para crear un modelo de elevación digital de alta resolución (Pringle *et al.*, 2012a).

Fosas clandestinas se cree que son más fáciles de detectar con técnicas térmicas durante los primeras semanas del entierro; Dickinson, (1976), encontró animales enterrados hasta 17 días post-entierro, aunque este plazo es influido por la geología local, nivel freático, y el tipo de suelo; después de este tiempo, se hace cada vez más difícil localizar puntos de entierro utilizando esta técnica (Larson *et al.*, 2011). Silvestri & Omri (2008) documentan cómo una combinación de imágenes térmicas, y el reconocimiento de las comunidades vegetales, identifican lugares de depósito de residuos ilegales en un ambiente de llanura de inundación. Aunque un área de estudio se puede cubrir con rapidez, la termografía puede verse afectada negativamente por factores ambientales, tales como condiciones meteorológicas adversas, por ejemplo, la alta precipitación y humedad elevada (Dickinson, 1976).

#### **2.1.4 Fotografías aéreas**

Tienen gran importancia en la búsqueda de fosas, pero sobre todo cuando se pretende encontrar personas que llevan varios años desaparecidas. Para esto es necesario mirar fotografías multitemporales que permitan conocer el antes y después del lugar donde supuestamente fue inhumada, y así conocer el uso del suelo, puesto que en ocasiones pueden existir construcciones realizadas sobre fosas con el fin de facilitar el ocultamiento.

#### **2.1.5 Geomorfología y mapas de suelos**

Se requiere consultar los mapas y características de los suelos de los lugares donde se va a realizar la búsqueda de la(s) fosa(s), ya que su resultado permite definir qué tipo de tecnología es la más adecuada para realizar la prospección geofísica. Igualmente se debe tener en cuenta aspectos importantes como la topografía, relieve, pendientes y vegetación.

La cartografía geomorfológica, se ha desarrollado en un contexto forense, mediante el uso de una combinación de mapas topográficos e hidrológicos para subdividir y priorizar potenciales subáreas de búsqueda (s). Esta técnica ha demostrado ser útil para la localización de fosas clandestinas de víctimas asesinadas (Ruffell & McKinley, 2008). Un caso de lo mencionado fue la búsqueda de una persona en Irlanda del Norte, donde el terreno fue detallado a través de la división de diez subáreas con base en el mapeo del relieve, la visibilidad de las carreteras y caminos, y uso del suelo entre otros elementos (Ruffell, 2005).

### **2.2 Trabajo de campo**

Es la segunda y definitiva etapa, donde se pretende tener éxito en la localización de la(s) fosa(s) con el uso de tecnología como el georadar, inducción electromagnética y geoelectrónica, de acuerdo al reconocimiento y evaluación de la zona de interés, para decidir que equipos son viables de utilizar.

#### **2.2.1 Detector de metales**

En Colombia, es indispensable utilizar este equipo en primera instancia, debido a que en las zonas rurales y semirurales donde hay fosas, también se encuentran bastantes campos minados, por lo cual es necesario garantizar la seguridad de las personas que realizarán el trabajo de búsqueda.

El detector de metales, también se utiliza durante la etapa inicial de búsqueda como parte de un programa por etapas, por ejemplo, se puede iniciar con la búsqueda a poca profundidad, es decir hasta 0,5 metros de profundidad, donde puede haber material metálico enterrado, así mismo, la información que se obtenga sirve como control (Davenport, 2001; Rezos *et al.*, 2010). Ejemplo de entierros clandestinos donde se ha utilizado detector de metales, se pueden detallar en Nobes (2000), y Pringle & Jervis (2010).

### **2.2.2 Reconocimiento y evaluación de la zona**

Se confronta la información recopilada y analizada en el escritorio con la realidad en el terreno, para lo cual es necesario iniciar recorriendo el área de interés, y definir si se mantienen las condiciones o hay cambios, sobre todo en el uso y tipo de suelos, ya que es requerimiento para escoger los equipos que puedan dar mejor resultado.

### **2.2.3 Prospección básica**

Hacer calicatas en un terreno sin alteración próximo al que se sospecha o indica por parte de los testigos, con el fin de tener como referencia el perfil del suelo original, y así poder evaluar los posibles hallazgos con respecto a suelo removido, lo cual se puede complementar con el uso de un barreno. También, se puede hacer ensayos de penetración para medir la resistencia del suelo con un equipo penetrológico (Sagripanti *et al.*, 2013).

Igualmente, se debe tener en cuenta los aspectos que pueden caracterizar a una fosa con base en el tiempo de construida, tales como el volumen mayor o menor de tierra que la cubre, depresiones, color del terreno, presencia o ausencia de vegetación con respecto al entorno.

### **2.2.4 Técnicas geofísicas**

Son múltiples las técnicas geofísicas que se pueden utilizar con fines forenses, de ahí que es necesario decidir cuáles son las más adecuadas de acuerdo al lugar(es) donde se van a emplear. El uso de susceptibilidad magnética, conductividad, resistividad y georadar estará enfocado a detectar anomalías que indiquen lugares potenciales con alteración del suelo natural.

Las técnicas de búsqueda con la aplicación de geofísica forense cerca de la superficie, tanto en el contexto ambiental, como humanitario, se lleva a cabo hasta una profundidad máxima de 10

metros, sin embargo, lo habitual es hacer la exploración en el primer metro (Fenning & Donnelly, 2004).

La teoría y metodología para la recolección y procesado de los datos con las técnicas de georadar, susceptibilidad magnética, conductividad y resistividad, se detallaron en el capítulo 2 y 3 respectivamente.

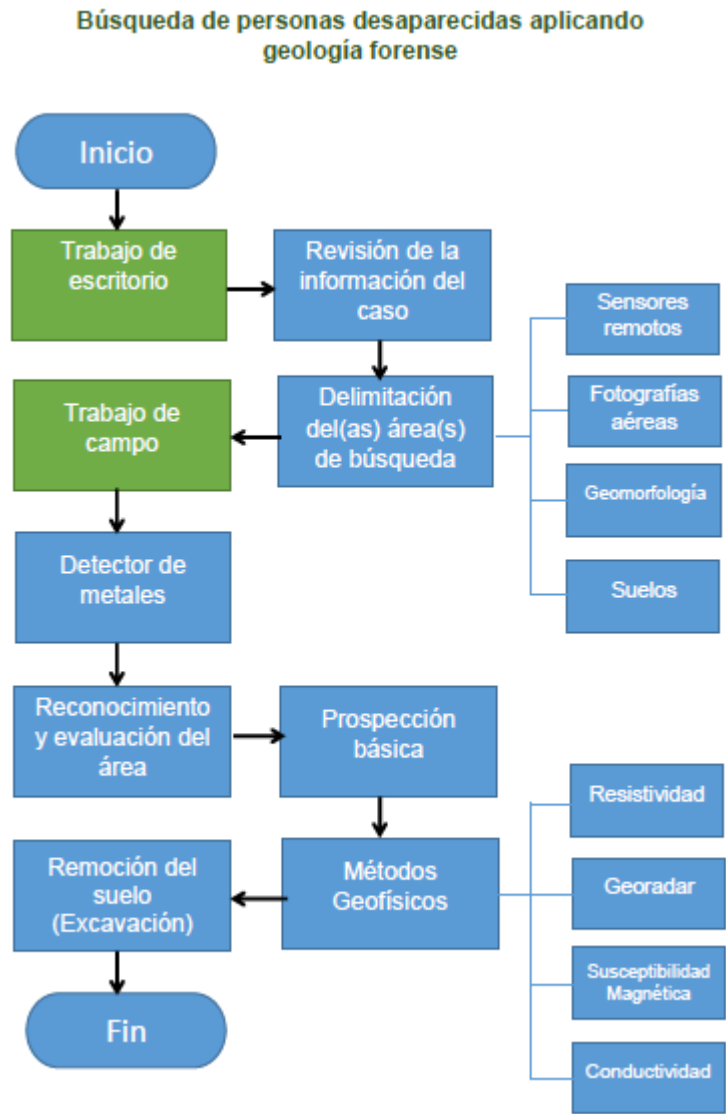
### **2.2.5 Remoción del suelo (excavación)**

Se procede cuando están definidas las anomalías en las áreas donde se ha realizado la exploración geofísica. Se escogerán las herramientas adecuadas para la excavación dependiendo la profundidad a la cual se pretende llegar, esto con el fin de evitar dañar los restos óseos y, o, alterar otros elementos materia de prueba que puedan estar en la(s) fosa(s).

## **3 Metodología para la búsqueda de personas desaparecidas aplicando geología forense**

De acuerdo a lo expuesto en el numeral 2, se resume la propuesta metodológica en la figura 1, donde a través de un diagrama de flujo se presenta los pasos a seguir, tanto en la fase de escritorio, como de campo.

**Figura 1** Diagrama con la metodología propuesta para la búsqueda de personas desaparecidas aplicando geología forense.



## Referencias

Aguilera, D., Giaccardi, A., Membrives, A., Carrara, M. T. y De Grandis, N. 2006. Santa Fe La Vieja, Arqueología de los Siglos XVI y XVII. Geofísica Aplicada a la Arqueología de “Santa Fe La Vieja”, Capítulo 7: 9 p., Facultad de Humanidades y Artes, UNR, Rosario.

Alongi, A., V. (1973) A short- pulse high resolution radar for cadáver detection. In Proceedings of the 1st International Electronic Crime Countermeasures conference, pp 79-87.

Amendt, J., Campobasso, C.P., Gaudry, E., Reiter, C., LeBlanc, H.N., Hall, M.J.R. (2007). Best practice in forensic entomology: standards and guidelines, *Int. J. Legal Medicine* 121, 90-104.

Aquila, I., Ausania, F., Di Nunzio, C., Serra, A., Boca, S., Capelli, A., Magni, P., Ricci, P. (2014). The role of forensic botany in crime scene investigation: case report and review of literature, *J. Forensic Sci.* 59, 820-824.

Australian Federal Police. Recuperado de: [www.afp.gov.au](http://www.afp.gov.au). Último acceso: octubre 30 de 2015.

Beres, M., Luetscher, M. and Olivier, R. (2001). “Integration of ground-enetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves”. *Journal of Applied Geophysics*. Vol.46, pp 249–262.

Bernabini M., Pettinelli, E., Pierdicca N., Piro S, and Versino L. (1995). “Field experiments for characterization of GPR, antenna and pulse propagation”. *Journal of Applied Geophysics*, Vol 33 pp 63-76.



- Bigman, D.P. (2012). The use of electromagnetic induction in locating graves and mapping cemeteries: an example from Native North America, *Arch. Prospect.* 19, 31-39.
- Blum, M., & Russo, Daniel. (2011). *Investigação de Objetos Contendo Substância Tóxica com o Uso do GPR. Estudo de Caso: Florianópolis, Brasil.* Sociedade Brasileira de Geofísica.
- Boyd, R.M. (1979). Buried Body Cases. *FBI Law Enforcement Bulletin*, 48 (2) pp 1-7.
- Brilis, G.M., Gerlach, C.L., van Waasbergen, R.J. (2000). Remote sensing tools assist in environmental forensics: Part I. Digital tools—traditional methods. *Environmental Forensics* 1, 63–67.
- Brothwell, D. & Higgs, E. (1982). “Ciencia en Arqueología”. Fondo de Cultura Económica.
- Brown, A.G. (2006). The use of forensic botany and geology in war crimes investigations in NE Bosnia, *Forensic Sci. Int.* 163, 204-210.
- Caperton, M. (2013). “Hidden graves give up their secrets to geologist”. *Earth Magazine.* American Geosciences Institute. August, p 17.
- Carter, D.O., Yellowlees, D., Tibbett, M. (2008). Using ninhydrin to detect gravesoil, *J. Forensic Sci.* 53, 397–400.
- Carter, D., Tibbett, M. (2009). Cadaver decomposition and soil: processes, in: M. Tibbett, D.O. Carter (Eds.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy: Chemical and Biological Effects of Buried Human Remains*, CRC Press, pp. 29–52.
- CEN/WS 059, prCWA 059. (2011). Best practice approach for electromagnetic induction (EMI) measurements of the near surface. European Committee for Standardization- CEN.
- Centro Nacional de Memoria Histórica. Recuperado de: [www.centrodememoriahistorica.gov.co](http://www.centrodememoriahistorica.gov.co).  
Último acceso: octubre 30 de 2015.

Cheetham, P. (2005). Forensic geophysical survey, in: J. Hunter, M. Cox, (Eds.) *Forensic archaeology: advances in theory and practice*, Routledge, pp. 62–95.

Congreso Nacional. República de Colombia. Ley 84 del 27 de diciembre de 1989. “Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Protección de los Animales y se crean unas contravenciones y se regula lo referente a su procedimiento y competencia”. Bogotá, Diario Oficial No.39120 de diciembre 27 de 1989.

Dajuric, M., Dunjic, D., Djonic, D., Skinner, M. (2007). Identification of victims from two mass-graves in Serbia: a critical evaluation of classical markers of identity, *Forensic Sci. Int.* 172, 125-129.

Davenport, C. (1998). *Where is it? Searching for Buried Bodies and Hidden Evidence*. Church Hill.

Davenport, G.C. (2001). Remote sensing applications in forensic investigations. *Historical Archaeology* 35, 87–100.

DECO-Geophysical Co. Ltd. (2005). *RadExplorer 1.4. User Manual*. Moscow.

Dekeirsschieter, J., Verheggen, F.J., Gohy, M., Hubrecht, F., Bourguignon, L., Lognay G., Haubruge E. (2009). Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus*) in different biotopes, *For Forensic Int.* 189, 46–53.

Dick, H.C., Pringle, J.K., Sloane, B., Carver, J., Wisniewski, K.D., Haffenden, A., Porter, S., Roberts, D., Cassidy, N.J. (2015). Detecting and characterising of Black Death burials by multi-proxy geophysical methods, *J. Arch. Sci.* 59, 132-141.

Dickinson, D.J. (1976). The aerial use of an infrared camera in a police search for the body of amissing person in New Zealand. *Journal of the Forensic Science Society* 16, 205–211.

Discovery Channel. Programa ‘Daily Planet’, video ‘Finding the Disappeared’. Emitido en septiembre 12 de 2013.

Donnelly, L. (2002). Finding the silent witness. *Geoscientist*, 12, pp 16–17.

Donnelly, L. & Harrison, M. (2010). Development of Geoforensic Strategy & Methodology to Search the Ground for an Unmarked Burial or Concealed Object. National Policing Improvement Agency, pp. 30-35.

Dupras, T.L., Schultz, J.J., Wheeler, S.M., Williams, L.J. (2006). Forensic recovery of human remains, CRC Press.

DW Consulting, (2014). Recuperado de [www.dwconsulting.nl/](http://www.dwconsulting.nl/). Último acceso: octubre 30 de 2015.

El País. Recuperado de: [www.elpais.com.co/elpais/judicial/noticias](http://www.elpais.com.co/elpais/judicial/noticias) . Último acceso: octubre 30 de 2015.

Ellwood, B.B. (1990). Electrical resistivity surveys in two historical cemeteries in northeast Texas: a method for delineating unidentified burial shafts, *Hist. Arch.* 24, 91–98.

Equitas. (2010). Methodological proposals for documenting and searching for missing persons in Columbia. [www.equitas.org.co/docs/45.pdf](http://www.equitas.org.co/docs/45.pdf). Último acceso: octubre 30 de 2015.

Fenning P.J. & Donnelly, L.J. (2004). Geophysical techniques for forensic investigation. In Pye, K and Croft, D.J. editors, *Forensic Geoscience: principles, techniques and applications*, pp 11-20 Geological Society, Special Publication 232.

Fiedler, S., Berger, J., Stahr, K. (2009). M. Graw, Localisation of a mass grave from the Nazi era—a case study, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller, (Eds.), Springer Pub, pp. 303–314.

Fiscalía General de la Nación. Recuperado de: [www.fiscalia.gov.co](http://www.fiscalia.gov.co). Último acceso: octubre 30 de 2015.

France, D.L., Griffin, T.J., Swanburg, J.G., Lindemann, J.W.; Davenport, G.C., Trammell V., Armbrust, C.T., Kondratieff, B., Nelson, A., Castellano, K., Hopkins, D. (1992). A

multidisciplinary approach to the detection of clandestine graves, *J. Forensic Sci.* 37, 1992 1445–1458.

Freeland, R.S., Miller, M.L., Yoder, R.E., Koppenjan, S.K. (2003). Forensic application of FM-CW and pulse radar. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. pp 97–103.

Frohlich, B. & Lancaster, W.J. (1986). Electromagnetic surveying in current middle eastern archaeology – Application and evaluation. *Geophysics*, 51, 1414-1425.

Gallón, J. (2015). Colombia's Only Forensic Geologist's Search for His Country's Disappeared People. *Vice*. Recuperado de [www.vice.com/read/the-grave-hunter-0000622-v22n4](http://www.vice.com/read/the-grave-hunter-0000622-v22n4). Último acceso: octubre 30 de 2015.

Gennard, D. (2012). *Forensic entomology: an introduction*, 2nd ed., Wiley-Blackwell.

Geometrics. (2002). *Magmap 2000 User Guide*.

Geoscan Research (2015). Recuperado de: [www.geoscan-research.co.uk/page72.html](http://www.geoscan-research.co.uk/page72.html)  
Último acceso: octubre 30 de 2015.

Grip, W.M., Grip, R.W., Morrison, R. (2000). Application of aerial photography in environmental forensic investigations. *Environmental Forensics* 1, 121–129.

Golden Software. (2002). *Surfer 8 User's Guide*. Recuperado de:  
[www.wi.zut.edu.pl/gis/Surfer\\_8\\_Guide.pdf](http://www.wi.zut.edu.pl/gis/Surfer_8_Guide.pdf). Último acceso: octubre 30 de 2015.

Guedes, A., Murray, R., Ribeiro, H., Sant'Ovaia, H., Valentim, B., Rodrigues, A., Leal, S., Noronha, F. (2013). The potential application of magnetic susceptibility as a technique for soil forensic examinations. *Geol. Soc. London Spec. Pub.* 384, pp. 75-83.

Hansen, J.D., Pringle, J.K. (2013). Comparison of magnetic, electrical and GPR surveys to detect buried forensic objects in semi-urban and domestic patio environments, in: D. Pirrie, A. Ruffell,

L.A. Dawson, (Eds.), *Environmental & Criminal Geoforensics*, Geol. Soc. London Spec. Pub., 384, pp. 229-251.

Hansen, J.D., Pringle, J.K., Goodwin, J. (2014). GPR and bulk ground resistivity surveys in graveyards: locating unmarked burials in contrasting soil types, *Forensic Sci. Int.* 237, e14-e29.

Harrison, M. & Donnelly, L.J. (2009). Locating concealed homicide victims: developing the role of geoforensics, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller, (Eds.), *Criminal and Environmental Soil Forensics*, Springer, pp. 197–219.

Hunter, J., Cox, M. (2005). *Forensic archaeology: advances in theory and practice*. Routledge Publishers.

Independent Commission for the Location of Victims Remains. Recuperado de: [www.iclvr.ie/](http://www.iclvr.ie/).  
Último acceso: octubre 20 de 2015.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC-. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras*. Departamento de Meta. IGAC.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC-. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 6ta. Edición. IGAC.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC-. (2014). *Estudio ultradetallado de los suelos del Centro Agropecuario Marengo*.

Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, Colombia. Recuperado de: [www.medicinalegal.gov.co](http://www.medicinalegal.gov.co). Último acceso: 30 de junio de 2015.

Işcan, M.Y., Solla, H.E., McCabe, B.Q. (2005). Victim of a dictatorial regime: identification of Mr. Roberto Gomensoro Josman, *Forensic Sci. Int.* 151, 213-220.

Jervis, J.R. (2010). *The detection of clandestine graves using electrical resistivity surveys: results from controlled experiments and a case study*. Keele University. Tesis PhD.

Jervis, J.R., Pringle, J.K., Tuckwell, G.W. (2009). Time-lapse resistivity surveys over simulated clandestine graves, *Forensic Sci. Int.* 192, 7–13.

Jervis, J.R. & Pringle, J.K. (2014). A study of the effect of seasonal climatic factors on the electrical resistivity response of three experimental graves. *J. App. Geophys.* 108, 53-60.

Juerges, A., Pringle, J.K., Jervis, J.R., Masters, P. (2010). Comparisons of magnetic and electrical resistivity surveys over simulated clandestine graves in contrasting burial environments, *Near Surf. Geophys.* 8, 529–539.

Kalacska, M., Bell, L.S., Sanchez-Azofeifa, G.A. Caelli, T. (2009). The application of remote sensing for detecting mass graves: an experimental animal case study from Costa Rica, *J. Forensic Sci.* 54, 159-166.

Kearey, P. y Brooks, M. (1991). *Geophysical Exploration*. Blackell Scientific Publications, Viena.

Killam, E.W. (2004). *The detection of human remains*. Charles C Thomas Pubs., Springfield, USA.

Koper K.D., Wallace, T.C, Taylor, S.R. and Hartse, H.E. (2001). Forensic seismology and the sinking of the Kursk. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 82: 37, 45-46.

Larson, D.O., Vass, A.A., Wise, M. (2011). Advanced scientific methods and procedures in the forensic investigation of clandestine graves, *J. Contemp. Crim. Justice* 27, 149–182.

Lasseter, A., Jacobi, K.P., Farley, R., Hensel, L. (2003). Cadaver dog and handler team capabilities in the recovery of buried human remains in the Southeastern United States, *J Forensic Sci.* 48, 1–5.

Linford, N. (2004). Magnetic ghosts: Mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves, *Arch. Prosp.* 11 167–180.

- Lynam, J. T. (1970) Techniques of geophysical prospection as applied to near surface structure determination. University of Bradford. Tesis PhD.
- Manrong, C., Lizhong, Y., Xiangfeng, N., Bin, C. (2009). Application of environmental magnetism on crime detection in a highway traffic accident from Yangzhou to Guazhou, Jiansu Province, China, *Forensic Sci. Int.* 187, 29–33.
- Marchesi, M., Cafarella, L., Di Mauro, D., Zirizzotti, A. (2001). Ground magnetometric surveys and integrated geophysical methods for solid buried waste detection: a case study. *Annals of Geophysics* 45, 563–573.
- Matias, H.C., Monteiro Santos, F.A., Rodruiges Ferreira, F.E., Machado, C., Luzio, R. (2006). Detection of graves using the micro-resistivity method. *Ann. Geophys.* 49, 1235–1244.
- Miller, P.S. (1996). Disturbances in the soil: finding buried bodies and other evidence using ground penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 41, 648–652.
- Milsom, J., Eriksen, A. (2011). *Field Geophysics*, 4th ed., Wiley.
- Ministerio de Salud. República de Colombia. Resolución Número 8430 de 1993. Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Bogotá.
- Molina, C.M., Saumett, M. and Romero, W. “Using GPR to search mass graves”. *Applied and Environmental Geophysics*, Memorias XIV Giambiagi Winter School. Buenos Aires. Argentina. p 54. July 16-20, 2012.
- Molina, C.M., Hernández, O., Pringle, J. (2013). Experiments to detect clandestine graves from interpreted high resolution geophysical anomalies, in: *Proc. Meeting of Americas, AGU, Cancun, México.* 14–17 de Mayo.
- Molina, C.M., Pringle, J.K., Saumett, M., Hernandez, O. (2015). Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany, *Forensic Sci. Int.* 248, 61-70.

Mrad de Osorio. (2006). Ética en la investigación con modelos animales experimentales. Alternativas y las 3 RS de Russel. Una responsabilidad y un compromiso ético que nos compete a todos, pp 163-183.

Murray, R.C. (2011). Evidence from the Earth. Missoula, MT: Mountain Press Publishing Company. 2nd Ed.

Necrosearch. (2014). Recuperado de <http://necrosearch.org/Training.html> Último acceso octubre 30 de 2015.

Nobes, D.C. (1999). Geophysical surveys of burial sites: a case study of the Oaro Urupa site, *Geophys.* 64, 357–367.

Nobes, D.C. (2000). The search for “Yvonne”: a case example of the delineation of a grave using near-surface geophysical methods, *J. Forensic Sci.* 45, 715–721.

Novo, A., Lorenzo, H., Ria, F., Solla, M. (2011). 3D GPR in forensics: finding a clandestine grave in a mountainous environment, *Forensic Sci. Int.* 204, 134-138.

Ossokoswki, A., Kuś, M., Brzeziński, P., Prüffer, J., Piatek, J., Zielińska, G., Bykowska, M., Jałowińska, K., Torgaszev, A., Skoryukov, A., Parafiniuk, M. (2013). Example of human individual identification from World War II gravesite, *Forensic Sci. Int.* 233, 179-192.

Owsley, D.W. (1995). Techniques for locating burials, with emphasis on the probe, *J. Forensic Sci.* 40, 735–740.

Parker, R., Ruffell, A., Hughes, D., Pringle, J. (2010). Geophysics and the search of freshwater bodies: a review, *Sci. Justice* 50, 141-149.

Powell, K. (2004). Detecting human remains using near-surface geophysical instruments, *Expl. Geophysics* 35, 88-92.



Pringle, J.K., Cassella, J.P., Jervis, J.R., Williams, A., Cross, P., Cassidy, N.J. (2015a). Soilwater conductivity analysis to date and locate clandestine graves of homicide victims, *J. For. Sci.* 60, 1052-1060.

Pringle, J.K., Giubertoni, M., Cassidy, N.J., Wisniewski, K., Hansen, J.D., Linford, N., Daniels, R. (2015b). The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool. *Forensic Sci. Int.* 246, 31–42.

Pringle, J., Giubertoni, M., Cassidy, N., Wisniewski, K., Hansen, J. Linford, N., Daniels, R. (2014). The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool. *Forensic Science International* 246, 31–42.

Pringle, J.K., Ruffell, A., Jervis, J.R., Donnelly, J.D., McKinley, J., Hansen, J.D., Morgan, R., Pirrie, D., Harrison, M. (2012a). The use of geoscience methods for terrestrial forensic searches, *Earth Sci. Rev.* 114, 108-123.

Pringle, J.K., Holland, C., Szkornik, K., Harrison, M. (2012b). Establishing forensic search methodologies and geophysical surveying for the detection of clandestine graves in coastal beach environments, *Forensic Sci. Int.* 219, e29-e36.

Pringle, J.K., Jervis, J.R., Hansen, J.D., Cassidy, N.J., Jones, G.M. Cassella, J.P. (2012c). Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and Ground Penetrating Radar methods: 0-3 years, *J. Forensic Sci.* 57, 1467-1486.

Pringle, J.K. & Jervis, J.R. (2010a). Electrical resistivity survey to search for a recent clandestine burial of a homicide victim, UK, *Forensic Sci. Int.* 202, e1-e7.

Pringle, J.K., Jervis, J.R., Cassella, J.P., Cassidy, N.J. (2008). Time-lapse geophysical investigations over a simulated urban clandestine grave, *J. Forensic Sci.* 53, 1405–1417.

Proyecto Desaparecidos. Por la Memoria, la Verdad y la Justicia. Recuperado de: [www.desaparecidos.org](http://www.desaparecidos.org). Último acceso: octubre 30 de 2015.

Quevedo, H. (2014). *Textos corporales de la crueldad: Memoria histórica y antropología forense*. Centro Nacional de Memoria Histórica.

Redmayne, D.W., Turbitt, T. (1990). Ground motion effects of the Lockerbie air crash impact. *Geophysical Journal International* 101, 293.

Reynolds, J.M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*, 2nd ed., Wiley.

Rezos, M.M., Schultz, J.J., Murdock II, R.A., Smith, S.A. (2010). Controlled research utilizing a basic all-metal detector in the search for buried firearms and miscellaneous weapons. *Forensic Science International* 195, 121–127.

Río, L., Overjero, J.I.C., Prieto, J.P. (2010). Identification process in mass graves from the Spanish Civil War I, *Forensic Sci. Int.* 199, e27-e36.

Río, L., García-Rubio, A., Martínez, B., Alonso, A., Puente, J. (2012). Identification process in mass graves from the Spanish Civil War II, *Forensic Sci. Int.* 219, e4-e9.

Rodríguez, J.V. (2004). *La Antropología Forense en la identificación humana*. Colombia 2004. Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez, J.V. (2011). *La identificación humana en Colombia. Avances y perspectivas*. Universidad Nacional de Colombia

Roy, A. & Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36:943–959.

Ruffell, A., McKinley, J. (2005). Forensic Geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations. *Earth Science Reviews*. 69 (3-4), pp 235-247.

Ruffell, A. (2005a). Burial location using cheap and reliable quantitative probe measurements, *Forensic Sci. Int.* 151, 207–211.

Ruffell, A. (2005b). Searching for the IRA “disappeared”: ground penetrating radar investigation of a churchyard burial site, *J. Forensic Sci.* 50, 1430–1435.

Ruffell, A. (2006). Under-water Scene Investigation Using Ground Penetrating Radar (GPR) in the Search for a Sunken Jet ski, Northern Ireland. *Science and Justice*, 46 (4) pp 221-230.

Ruffell, A. & McKinley J. (2008). *Geoforensics*. Willey Black.

Ruffell, A. & Kulsea, B. (2009). Application of geophysical techniques in identifying illegally buried toxic waste. *Environmental Forensics*, 10: 196-207.

Ruffell, A., McCabe, A., Donnelly, C., Sloan, B. (2009). Location and assessment of an historic (150–160 years old) mass grave using geographic and ground penetrating radar investigation, NW Ireland, *J. Forensic Sci.* 54, 382–394.

Ruffell, A. Pringle, J.K., Forbes, S. (2014). Search protocols for hidden forensic objects beneath floors and within walls, *Forensic Sci. Int.* 237, 137-145.

Ruffell, A. & McKinley, J. (2014). Forensic geomorphology, *Geomorphology* 206 14-22.

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.

Sato, M., Hamada, Y., Feng, X., Kong, F.-N., Zheng, Z and Fang, G. (2004). GPR using an array antenna for landmine detection. *Near Surface Geophysics* 2, pp 3-9.

Schultz, J., Healy C., Kenneth Parker, K., Lowers B. (2013). Detecting submerged objects: The application of side scan sonar to forensic contexts. *Forensic Science International* 231 pp 306–316.

Schultz, J.J., Martin, M.M. (2012). Monitoring controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar, *J. Applied Geophys.* 83, 74–89.

Schultz, J.J., Martin, M.M. (2011). Controlled GPR grave research: comparison of reflection profiles between 500- and 250-MHz antennae, *Forensic Sci. Int.* 209, 64–69.

Schultz, J.J. (2008). Sequential monitoring of burials containing small pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 53, 279–287.

Schultz, J.J. (2007). Using ground-penetrating radar to locate clandestine graves of homicide victims: forming forensic archaeology partnerships with law enforcement, *Homicide Studies.* 11, 15-29.

Schultz, J.J., Collins, M.E., Falsetti, A.B. (2006). Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 51, 607–616.

Scotland Yard, Recuperado de <http://content.met.police.uk/Home>. Último acceso: octubre 30 de 2015.

Silvestri, S. & Omri, S. (2008). A method for the remote sensing identification of uncontrolled landfills: formulation and validation. *International Journal of Remote Sensing* 29, 975–989.

Solla, H.E. & Işcan, M.Y. (2001). Skeletal remains of Dr. Eugenio Berrios Sagredo, *Forensic Sci. Int.* 116, 201-211.

Strongman, K.B. (1987). *Forensic applications of ground penetrating radar*. Edmonton, Alberta, Canada: Royal Canadian Mounted Police.

Strongman, K.B. (1992). Forensic applications of ground penetrating radar, in: J. Pilon (Ed.) *Ground penetrating radar*, Geol. Survey Canada Paper 90-4, 203–211.

Syrian Observatory for Human Rights, Recuperado de: [www.syriahr.com](http://www.syriahr.com), Último acceso: octubre 30 de 2015.

Szleszkowski, L., Thannhäuser, A., Szwagrzyk, K., Konczewski, P., Kawecki, J., Świątek, B. (2014). Exhumation research concerning the victims of political repressions in 1945-1956 in Poland: a new direction in forensic medicine, *Forensic Sci. Int.* 235, e1-e6.

Unimedios. (2013). "Laboratorio forense para localizar fosas comunes". Agencia de Noticias Universidad Nacional de Colombia. Ciencia y tecnología. Recuperado de: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/laboratorio-forense-para-localizar-fosas-comunes.html> Último acceso 30 de octubre de 2015.

Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: [www.marengo.unal.edu.co/GENERALIDADES.pdf](http://www.marengo.unal.edu.co/GENERALIDADES.pdf). Último acceso: abril 30 de 2015.

Telford, W. Geldart, L. y Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics*. 2º De. Cambridge.

Thiesson, J., Rousselle, G., Simon, F., Tabbagh, A. (2011). Slingram EMI prospection: Are vertical orientated devices a suitable solution in archaeological and pedological prospection? *J. App. Geophys* 75, 731-737.

Varas, C.G., Leiva, M.I. (2012). Managing comingled remains from mass graves: considerations, implications and recommendations from a human rights case in Chile, *Forensic Sci. Int.* 219, e1 9-e24.

Vass, A.A., Smith, R.R., Thompson, C.V., Burnett, M.N., Dulgerian, N., Eckenrode, B.A. (2008). Odor analysis of decomposing human remains, *J. Forensic Sci.* 53, 384–391.

Witten, A., Brooks, R., Fenner, T. (2000). The Tulsa race riot of 1921: a geophysical study to locate a mass grave, *Leading Edge* 20, 655–660.

Witten, A. (2006). *Handbook of Geophysics and Archaeology*. Equinox Publishing Limited, London.

Zúñiga, O. & Rodríguez, C.A. (2010). *Arqueología de precisión*. Universidad del Valle.



# Apéndices

1. Molina, C.M., Hernández, O., Pringle, J. (2013). Experiments to detect clandestine graves from interpreted high resolution geophysical anomalies, in: Proc. Meeting of Americas, AGU, Cancun, México. 14–17 de Mayo.
2. Discovery Channel. Programa ‘Daily Planet’, video ‘Finding the Disappeared’. Emitido en septiembre 12 de 2013.
3. Gallón, J. (2015). Colombia’s Only Forensic Geologist’s Search for His Country’s Disappeared People. Vice. Recuperado de [www.vice.com/read/the-grave-hunter-0000622-v22n4](http://www.vice.com/read/the-grave-hunter-0000622-v22n4). Último acceso octubre 30 de 2015.
4. Molina, C.M., Pringle, J.K., Saumett, M., Hernandez, O. (2015). Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany, *Forensic Sci. Int.* 248, 61-70.
5. Molina, C.M., Pringle, J.K., Saumett, M., Gettin, O. (2016). Geophysical monitoring of simulated graves with resistivity, magnetic susceptibility, conductivity and GPR in Colombia, South America”. *Forensic Sci. Int.* 261, 106-115.





## Untitled

Posted by: Koula Bouloukos  
Date Posted: Mar 18, 2014 at 10:00  
Available Until: May 17, 2014

### Media Items



V224220\_FINDING THE  
DISAPPEARED\_KB



### V224220\_FINDING THE DISAPPEARED\_KB

Posted by: Koula Bouloukos  
Date Posted: Mar 18, 2014 at 10:00

Description: No Description Available Duration: 00:05:52:14 Start TC: 01:00:00:00



| [Download File](#)

# Cazador de fosas

Abril 16, 2015



por [Juan Pablo Gallón](#)

Jefe de redacción @ VICE Colombia



*Debido a la dificultad de encontrar a los miles de desaparecidos en Colombia, la gente acude a la Virgen y los santos para aliviar la incertidumbre. Fotos por Andrés Vanegas Canosa.*

"Desde 1996 tengo cinco familiares desaparecidos", me dice Jacqueline Orrego, una mujer de 46 años, de Frontino, Antioquia, hija, hermana, prima y amiga de cinco personas asesinadas por órdenes de Carlos Castaño y ejecutadas por alias Memín, del Bloque Noroccidental de las AUC. Familiares enterrados sin nombre y sin oraciones bajo una tierra que Orrego solo quisiera olvidar.

"Hemos encontrado tres cuerpos: el de mi mamá (Mercedes Toro), el de mi padrastro (Juan Carlos Ortiz) y el de mi hermana (Claudia Orrego)", afirma Jacqueline, quien halló en agosto de 2007, en la finca del padre del actual alcalde de Medellín, Aníbal Gaviria, los restos sin vida de tres de sus

familiares. Faltan, sin embargo, por localizar los de Franklin Aurelio, su primo, y Guillermo Cuartas, un amigo suyo.

"Vos siempre tenés zozobra, siempre tenés la esperanza de que van a aparecer, aunque te digan que están muertos. Cada vez que suena el timbre tenés la ilusión de que sean ellos. Siempre estás en agonía pensando dónde estarán o si se van a quedar perdidos. Cuando uno los encuentra descansa. Incluso si encontrás el cuerpo y lo enterrás, ahí no termina el dolor, no termina la historia. Porque en un país como este, no solo te matan a los tuyos, sino que tienes a la justicia en tu contra", asegura Jacqueline, cuyos familiares habían sido acusados por los mismos paramilitares de ser guerrilleros, siendo inocentes.

La historia de Jacqueline y sus familiares hace parte de una estadística dramática en el país. Según el Registro Nacional de Desaparecidos (RNP), un sistema que recopila desde comienzos de siglo XX información de varias instituciones como la Fiscalía, Medicina Legal y la Defensoría del Pueblo, el número de desaparecidos en el país a 2013 era de 85.000 personas. Gustavo Duque, fiscal especializado de la Dirección Nacional de Justicia Transicional, estima que esta cifra puede estar hoy cercana a las 96.000 personas.

Hacen parte de dicho número las llamadas desapariciones voluntarias, entre las que se pueden encontrar casos como los de niños que abandonan la casa de padres maltratadores, la de jóvenes que se escapan a vivir con sus parejas, personas en estado de indigencia o la de individuos bajo los efectos de la escopolamina. También hacen parte de este número las desapariciones forzadas, definidas como las privaciones de la libertad mediante cualquier forma, seguida de un ocultamiento de dicha privación. Según la base de datos del Sirdec, a marzo de 2014 había más de 20.000 víctimas de desaparición forzada registradas en el país.



*Desde 2006, Molina se ha dedicado a desarrollar metodologías que permitan localizar y rastrear, de manera más precisa, cuerpos enterrados en el suelo.*

Buscarlos. Buscarlos a todos.

Esa ha sido la misión que se ha impuesto Carlos Martín Molina Gallego, un bogotano de 48 años, quien es el único geólogo forense del país.

La geología forense es el estudio, la investigación y la ubicación de cuerpos u objetos enterrados en el subsuelo usando métodos geofísicos —susceptibilidad magnética, conductividad, resistividad— para ayudar a resolver casos legales y forenses. Haciendo uso de los conocimientos de esta ciencia, y como una suerte de Sherlock Holmes criollo que ha cambiado la pipa por un sombrero vueltiao, el opio por las galletas de ajonjolí y al señor Watson por su mamá y su esposa, que son las dos personas que lo han acompañado incondicionalmente en su investigación, Molina se ha dedicado a buscar a aquellos a los que la violencia y la tierra y el tiempo se han encargado de poner en silencio. Lo hace porque esta investigación se ha vuelto su vida y porque, simplemente, en Colombia, alguien tenía que hacerlo.

La investigación que propuso en 2006 y que se convirtió en realidad en 2012 en el marco de un doctorado en geociencias en la Universidad Nacional tiene como objetivo "generar una metodología para la búsqueda de fosas a partir de la interpretación de datos tomados con métodos geofísicos de alta resolución, a poca profundidad".

Una metodología y unas herramientas tecnológicas de búsqueda con las cuales Molina podría haberse dedicado a buscar oro o petróleo y hacer un buen dinero. En cambio, se dedicó a buscar cuerpos. Algunos dirán que, al fin y al cabo, esta actividad puede llegar a salir igual de rentable en el país de la Ley de Justicia y Paz y las negociaciones con las FARC. Sin embargo, como dice Molina, "infortunadamente en el país no hay visión para invertir en esto".

Por eso sus procedimientos se mantienen aún en el terreno de lo académico y no han dado el salto hacia lo práctico. Una falta de visión que ha hecho que buscar cuerpos, en un país donde solamente el año pasado 4.539 personas desaparecieron, 99% de ellas objeto de desaparición forzada, sea una labor altruista e implique un cierto voto de pobreza.

Entonces ¿Por qué hacerlo?

"El eje de esta investigación son las víctimas y está enfocada en las personas que tienen familiares desaparecidos cuya búsqueda ha sido un calvario. Poder ayudar a esclarecer estos casos tiene además una gran trascendencia en términos judiciales, ya que podría ayudar a descongestionar los juzgados y a reducir la impunidad", advierte este investigador que además lleva trabajando como perito en Medicina Legal durante varios años y como forense durante diecinueve años.



*La lluvia altera la porosidad de la tierra lo cual debe ser un factor a tener en cuenta al hacer la búsqueda de cuerpos.*

Inferir de los silencios, hilar historias que se rompieron, indagar para conocer la verdad, para olvidar o, mejor, para perdonar, ese es el negocio de este cazador de fosas, de este defensor del derecho a saber. "Declarar un lugar como 'campo santo', como alguna vez lo enunció Pacho Santos, a un lugar al que entraron muchas personas y del cual nunca salieron, es solo una forma más de impunidad. Porque impunidad es también no buscar las evidencias, ni tratarlas como debe ser. Si se sabe que están ahí, que nunca salieron, pues hay que ir a buscarlos", advierte Molina.

Su inquietud por generar una metodología y explorar las técnicas y tecnologías del oficio de la geología forense surgió en 2000, cuando visitó varias regiones de Colombia buscando desaparecidos con unidades de distintos organismos judiciales y de derechos humanos. Expediciones a departamentos como el Cesar y a municipios como Mapiripán, en los que, tras la recolección de testimonios de informantes, se hacían misiones para encontrar cuerpos. Despliegues logísticos en los que la única herramienta de Molina era una sonda metálica que se insertaba en la tierra para explorar qué tan blando estaba el terreno, lo cual podría ser tratado como un indicio. "La sonda puede ser efectiva cuando el muerto es una persona recientemente desaparecida, pero es ineficaz con un cuerpo que lleve enterrado cinco, diez o veinte años", asegura Molina. El geólogo regresaba siempre de estas misiones sin ningún resultado positivo.

En un área controlada de 200 metros cuadrados, en Mosquera, Cundinamarca, Molina creó desde junio de 2013 un laboratorio forense que le permitiera tener resultados a escala que puedan ser, posteriormente, aplicados en casos reales. En dicho encerramiento simuló las condiciones de ocho posibles fosas comunes. En dos de ellas enterró dos marranos, animales cuyos cuerpos pueden descomponerse de manera similar al de un humano; las siguientes dos las dejó vacías, en la tercera dupla enterró dos esqueletos completos de humanos y en las últimas dos solo huesos largos e incinerados, simulando decapitaciones y la quema de los cadáveres, circunstancias similares en las que se han encontrado fosas comunes en el país.

Las excavaciones fueron realizadas a profundidades entre los 120 y los 80 centímetros. Esto tiene una razón de ser: "Cerca del 60% de las fosas en Colombia han sido encontradas a profundidades entre los 40 y 60 centímetros". El resto aparece entre los 80 y los 120 centímetros.

Al crear este espacio Molina tuvo en cuenta, además, factores que garantizaran que la simulación emulara las condiciones reales del terreno. Se aseguró, por ejemplo, de que el tipo de suelo fuera franco-arcilloso o arcilloso, como suele ser el colombiano; también tuvo en cuenta variables como la textura, humedad y pluviosidad a la que estaba sometida dicha superficie, y tuvo en cuenta la memoria de uso del suelo, pues la tierra, a diferencia de mucha gente y gobiernos, sí recuerda todo aquello que estuvo en contacto con ella.

Cuando el suelo se altera, como ocurre con una excavación para enterrar cuerpos, sus propiedades físicas cambian. "Con una excavación todo se altera: la susceptibilidad magnética y la conductividad, entre otros aspectos, se modifican. Encontrar y medir con diferentes equipos dichas alteraciones es parte del propósito de mi investigación", asegura Molina.

Los procedimientos y aparatos con los que trabaja Molina parten de un principio básico que se podría enunciar así: se emite una señal, después se recibe una respuesta que al ser decodificada trae consigo la presencia o ausencia de una anomalía en el terreno que podría insinuar la presencia de una posible fosa. Lo que varía es el tipo de señal que se emite y la manera de recibirla.



*Para su experimento Molina excavó ocho tumbas, seis a 80 cm de profundidad, y dos a 120 cm en las que enterró dos cerdos.*

Los métodos que Molina ha aplicado en sus laboratorios forenses han sido el GPR, un radar de penetración del terreno, que usa ondas electromagnéticas para encontrar cuerpos en el subsuelo; la geoelectrónica, la cual introduce corriente al suelo para calcular las variaciones de la resistividad (lo contrario a la conductividad, es decir la resistencia al paso de corriente), y un perfilador que hace

inducción electromagnética, emitiendo frecuencias entre los 1.000 y 15.000 hercios, el cual permite medir la conductividad y la susceptibilidad magnética del suelo.

Carlos Martín Molina busca la verdad dentro de la tierra: "Esta investigación está pensada para todo el país y para todos los desaparecidos, ninguno en especial. Estoy a disposición de las personas que toman las decisiones para que pueda proceder a hacer mi aporte en la medida de mis capacidades y de los conocimientos que estoy adquiriendo. Estoy dispuesto a ir a buscar al que sea y en donde sea".

*Este artículo hace parte de '[¡PACIFISTA! Una plataforma para la generación de paz](#)', un proyecto periodístico de VICE sobre el conflicto y la paz en Colombia. Visítanos en [www.pacifista.co](http://www.pacifista.co).*



# Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany



Carlos Martin Molina<sup>a,\*</sup>, Jamie K. Pringle<sup>b</sup>, Miguel Saumett<sup>c</sup>, Orlando Hernández<sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia y Laboratorio de Evidencia Traza, Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, Bogotá, Colombia*

<sup>b</sup> *School of Physical Sciences & Geography, Keele University, Staffordshire ST5 5BG, UK*

<sup>c</sup> *GeoSense, Carrera 7 # 127-48 Of., 1007 Bogotá, Colombia*

<sup>d</sup> *Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 18 June 2014

Received in revised form 10 November 2014

Accepted 12 December 2014

Available online 20 December 2014

### Keywords:

Forensic science  
Forensic geophysics  
GPR  
Simulated grave  
Botany

## ABSTRACT

In most Latin American countries there are significant numbers of missing people and forced disappearances, 68,000 alone currently in Colombia. Successful detection of shallow buried human remains by forensic search teams is difficult in varying terrain and climates. This research has created three simulated clandestine burial styles at two different depths commonly encountered in Latin America to gain knowledge of optimum forensic geophysics detection techniques. Repeated monitoring of the graves post-burial was undertaken by ground penetrating radar. Radar survey 2D profile results show reasonable detection of ½ clothed pig cadavers up to 19 weeks of burial, with decreasing confidence after this time. Simulated burials using skeletonized human remains were not able to be imaged after 19 weeks of burial, with beheaded and burnt human remains not being able to be detected throughout the survey period. Horizontal radar time slices showed good early results up to 19 weeks of burial as more area was covered and bi-directional surveys were collected, but these decreased in amplitude over time. Deeper burials were all harder to image than shallower ones. Analysis of excavated soil found soil moisture content almost double compared to those reported from temperate climate studies. Vegetation variations over the simulated graves were also noted which would provide promising indicators for grave detection.

© 2014 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

In many South American countries there are significant numbers of people missing and those who have been subjected to forced disappearances [1]. For example, in Colombia there are currently ~68,000 people missing, of which it has been estimated that ~20,800 are forced disappearances [2]. Discovered clandestine graves of victims have been reported to be isolated [3,4], co-mingled and mass burials [5], and in a variety of burial styles, depths below ground level and depositional environments [3–5]. Such numbers of victims has been reported elsewhere

globally, for example, in 19th Century Irish mass burials [6], USA race riot victims [7], Spanish Civil War mass burials [8,9], World War Two burials [10,11], in post-WW2 Polish repression mass burials [12], the Northern Ireland ‘Troubles’ mostly isolated burials [13], the 1990s Balkan wars mass burials [14,15], and sadly in active civil wars with both isolated and mass burials [16].

Current forensic search methods to detect both isolated and mass clandestine burials of murder victims are highly varied and have been reviewed elsewhere [17,18], with best practice suggesting a phased approach, moving from large-scale remote sensing methods [19] down to initial ground reconnaissance [20] and control studies before full searches are initiated [21,22]. These full searches have also involved a variety of methods, including forensic geomorphology [20], forensic botany [23,24] and entomology [25,26], scent-trained search dogs [27,28], physical probing [29–31], thanatochemistry [32–34] and near-surface geophysics [35–42].

\* Corresponding author. Tel.: +57 3002 121736.

E-mail addresses: [cmmolinaga@unal.edu.co](mailto:cmmolinaga@unal.edu.co) (C.M. Molina), [j.k.pringle@keele.ac.uk](mailto:j.k.pringle@keele.ac.uk) (J.K. Pringle), [miguel.saumett@geosenservices.com](mailto:miguel.saumett@geosenservices.com) (M. Saumett), [ohernandezh@unal.edu.co](mailto:ohernandezh@unal.edu.co) (O. Hernández).



Recent geophysical research using simulated clandestine graves have found optimal detection methods and configurations are highly variable, depending upon a host of factors, the most important deemed to be time since burial, burial style, local soil type, vegetation and climate [35,43–54].

Although forensic research has been undertaken in the fields of forensic entomology [55,56], anthropology [57] and osteology [58] in Latin America, there has been limited geophysical research to assist forensic search teams with the successful detection of both isolated and mass burials of human victims, although a pilot study has shown promise [59]. The paper aims are to *firstly* detail the several simulated clandestine graves that were established in the test site; these were deliberately created to be those typically encountered by forensic search teams in rural Latin America and specifically Colombia. *Secondly* the results of GPR sequential monitoring over the simulated clandestine graves over nine months will be detailed and compared to other studies. *Thirdly* and finally the results of simple 'grave' soil moisture content analysis and surface botanical variations observed will also be documented.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study site

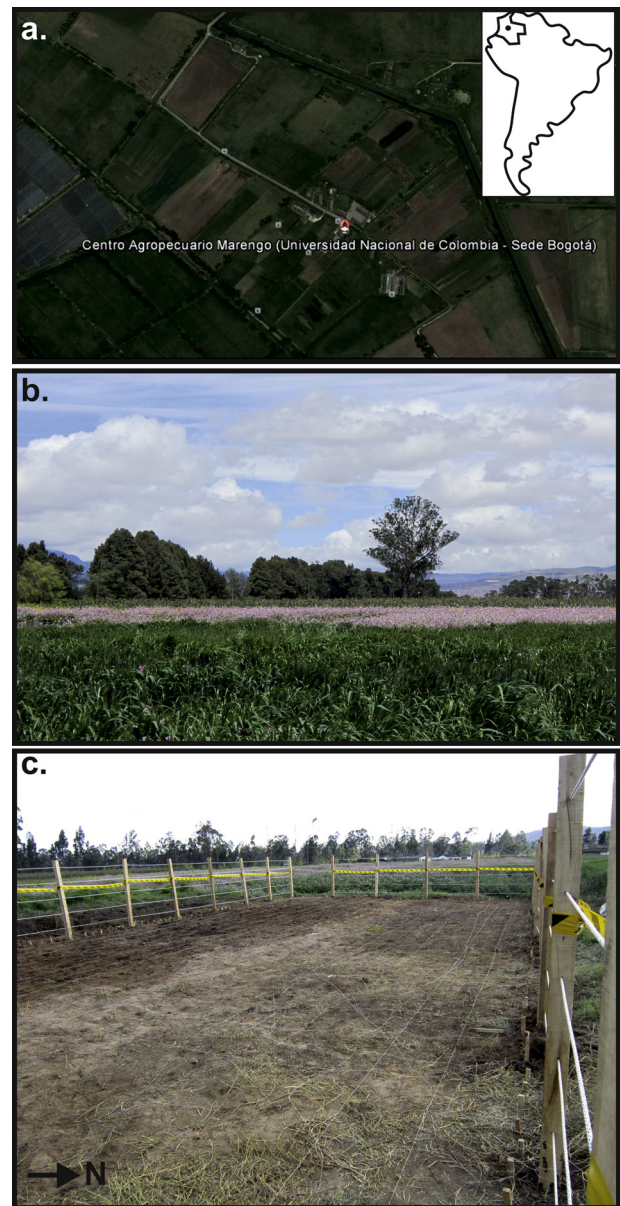
The chosen controlled test site was situated in land owned by the National University of Colombia ~14 km north of the capital city of Bogotá (Fig. 1a). The study site was in a rural neo-tropical environment that had cleared dense vegetation that was typical of those encountered away from coastal areas in Colombia (Fig. 1b). The site was situated ~2500 m above sea level. Geologically the site is underlain by fluvio-lacustrine terrace of the Sabana Formation of Middle and Late Pleistocene age. The local soil type is an andisol from lacustrine sediments and volcanic ash (Fig. 1c), with an organic topsoil horizon – ~5–60 cm thick and a red clay-rich loam beneath.

The Tibaitatá Centre for Agricultural research had a meteorological weather observation station ~1 km from the test site, which continually recorded rainfall and temperature data. The site was observed to have an average temperature of 14 °C and annual rainfall rates of between 500–1000 mm per year [60] [www.marengo.unal.edu.co].

### 2.2. Simulated graves

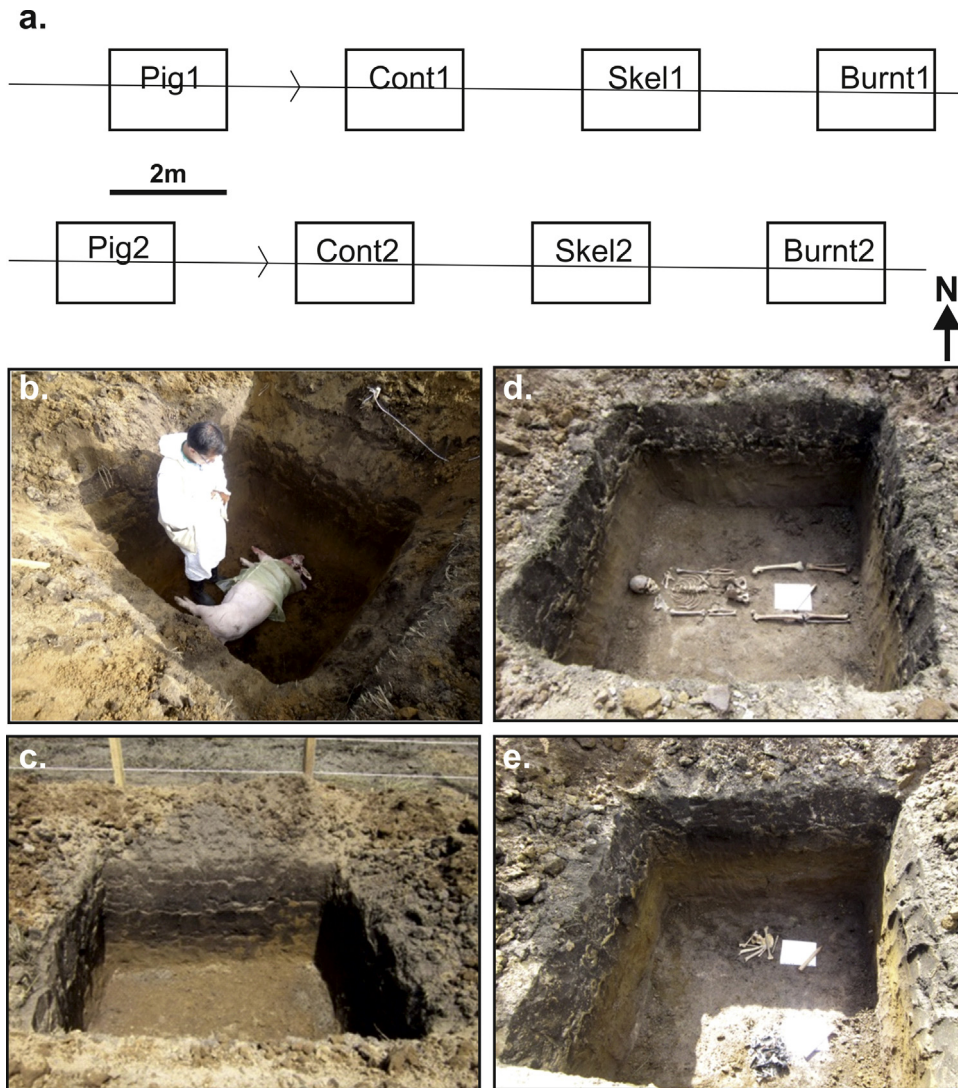
It was decided to use freshly dispatched domestic pig cadavers to simulate clandestine graves of murder victims as they are commonly used in such monitoring experiments [44–52,54], comprising similar chemical compositions, body size, tissue:body fat ratios and skin/hair types to humans [61]. Human remains were also able to be used in Colombia in this research, to represent clandestine graves which had been emplaced long enough for human remains to be skeletonized. The time frame that this would occur would typically be months to years post-burial, depending on local climate, soil type and other variables described elsewhere [17].

Resolution 8430 of the Ministry of Health Act (1993) and the National Charter for the Protection of Animals (1989) covered biomedical research for humans and animals respectively in Colombia (Ministry of Health, 1993). The same resolution provided recommendation on the dignity of human remains which was followed; human remains for this project were donated by the Colombian Association of Forensic Anthropology (ACAF) after a historical archaeological rescue. Best practice was also followed on the use of animals, namely non-conscious, minimal numbers and also minimizing any animal pain and discomfort [62]. The National University of Colombia Faculty of Science ethics committee had also approved the project.



**Fig. 1.** (a) Aerial photograph of the Marengo Agricultural Center of the National University of Colombia with location (inset). (b) General site photograph. (c) Fenced test site with cleared vegetation photograph.

Eight simulated clandestine graves were excavated on 19th June 2013. For each grave, the overlying vegetation was removed and c. 2 m × 2 m holes were dug in a regular pattern (Fig. 2a) as other researchers have undertaken [46–52]. Soil from both the top and main andisol soil were taken from all graves for analysis. Four graves were dug to ~0.8 m below ground level (bgl) and four dug to ~1.2 m bgl respectively, these depths have been commonly encountered in discovered clandestine graves in Colombia (see Table 1 for details). Note these were deeper than the average 0.5 m burial depths bgl reported in the U.S. [63] and UK [64]. Two simulated graves (Pig1/2) had freshly dispatched (electrocuted and bled <6 h before burial) ~70 kg domestic pig carcasses emplaced in the centre, with them both having their lower half wrapped with cloth and the other wrapped with plastic as this was a common burial scenario in Colombia [65]. A further two graves (Cont1/2) were empty acting as control and were refilled by the excavated soil. The next two graves (Skel1/2) contained skeletonized human



**Fig. 2.** (a) Plan-view of control test site showing positions of eight simulated clandestine graves (annotated) with top row depths  $\sim 0.8$  m and bottom row  $\sim 1.2$  m below ground level (bgl). Selected 2D GPR profile lines and orientations also shown. (b) Simulated clandestine grave with  $\frac{1}{2}$  clothed domestic pig cadaver. (c) simulated clandestine empty grave for control. (d) Simulated clandestine grave with skeletonized human remains and bullet casings. (e) Simulated clandestine grave with beheaded and burnt skeletonized human remains. See text for details.

remains together with various small arms shell casings and the final two graves (Burnt1/2) contained beheaded and burnt skeletonized human remains as these burial style scenarios are also common in Colombia [66]. All graves with contents were then refilled with excavated soil back to ground level.

### 2.3. Ground penetrating radar data collection and processing

Repeat GPR survey datasets were collected within the survey area (Fig. 2a) at c. 1-monthly intervals after burial (Table 2). Most published forensic case studies using GPR use medium

**Table 1**

Details of simulated clandestine graves emplaced at the test site with dimensions, contents and justifications all given. A1-D1 were emplaced  $\sim 0.8$  m below ground level (bgl) and A2-D2 were emplaced at  $\sim 1.2$  m bgl respectively (see Fig. 2 for location).

Grave no.	Dimensions	Contents	Description	Justification
A1/A2	2 m $\times$ 2 m $\times$ 0.8 m/1.2 m	70 kg domestic pig carcass freshly dispatched	Bottom half wrapped in cloth	Represents $\frac{1}{2}$ clothed common scenario
B1/B2	2 m $\times$ 2 m $\times$ 0.8 m/1.2 m	None	Dug and re-filled	Acted as control
C1/C2	2 m $\times$ 2 m $\times$ 0.8 m/1.2 m	Skeletonized human remains with 6 $\times$ 9 mm and 4 $\times$ 38 mm bullet casings	Skeleton placed in dorsal extended position	Common homicide scenario
D1/D2	2 m $\times$ 2 m $\times$ 0.8 m/1.2 m	Beheaded skeletonized and burnt human remains	Bones laid out anatomically correct	Common homicide scenario

**Table 2**  
Summary of geophysical data collected during this study.

Survey date	Survey day after burial <sup>a</sup>	Accumulated degree day (ADD)
20/06/2013	1	22
03/07/2013	14	210
09/07/2013	20	303
15/07/2013	27	382
26/09/2013	100	1303
23/10/2013	127	1683
14/11/2013	149	1953
28/01/2014	224	3002
06/03/2014	261	3510

<sup>a</sup> Burial date was 19th June 2013. Accumulated degree day calculated from average daily temperature information (see text for details).

(200–500 MHz) dominant frequency antennae (e.g. [6,37,42]) and seems to be judged optimal by others monitoring simulated clandestine burials (e.g. [44,49,52]), thus 250 MHz dominant frequency shielded bistatic antennae were used by MALA acquisition equipment in this study. The 20 m × 10 m survey grid was GPR surveyed on both north-south and east-west oriented, 0.25 m spaced, parallel survey lines with 0.02 m radar trace spacings throughout using a 30 ns time window, which should penetrate to a depth of 1.60 m bgl.

Once the 2D GPR profiles were acquired by the RadExplorer™ data collection software, they were downloaded and imported into RADAN v6.6 data processing software. For each profile, standard sequential processing steps were undertaken to optimize image quality, namely; (i) DC removal; (ii) time-zero adjustment to make all traces consistent, this adjustment eliminates the time zero; (iii) 2D spatial filtering; (iv) bandpass filtering to reduce noise; (v) amplitude correction to boost deeper reflection amplitudes, and (vi) deconvolution. Once completed and with all GPR 2D profiles having their known spatial position added, horizontal time-slices of the GPR data were generated for each repeat GPR survey.

#### 2.4. Vegetation data collection

Botanical plants that grew on the graves during the first 3 months after burial were collected, in order to identify following the protocol of the National Herbarium of the Universidad Nacional de Colombia [67].

### 3. Results

#### 3.1. Ground penetrating radar

Selected GPR 250 MHz 2D profiles acquired through the survey period are shown in Fig. 3 (see Fig. 2a for respective profile locations). The simulated modern clandestine grave with pigs as murder victim analogues at both 0.8 m bgl (Pig1) and 1.2 m bgl (Pig2) were generally imaged throughout the survey period as good to poor ½ hyperbolic reflection events but became progressively less clearly defined after 38 weeks of burial (Fig. 3). The simulated empty control graves were poorly imaged as areas of loss of signal continuity (Fig. 3). The simulated historic clandestine graves with skeletonized remains at both 0.8 m bgl (Skel1) and 1.2 m bgl (Skel2 showed low amplitude ½ hyperbolic reflection events up to 19 weeks post-burial, but was not able to be imaged after this time) (Fig. 3). The simulated historic clandestine graves with beheaded and burnt skeletonized remains were not able to be imaged throughout the survey period, with perhaps some loss of radar signal continuity at this location on each respective 2D profile (Fig. 3).

The GPR 250 MHz horizontal time slices generated from the 250 MHz 2D profiles generally showed surprisingly good results for the respective four, fifteen and nineteen weeks after burial time slices (Fig. 4a–c), with discrete square-shaped anomalies of high radar amplitudes present in all time slices that could be mostly correlated to all the respective simulated clandestine burial positions. However, these target locations had progressively reducing radar signal amplitudes for the successive twenty-two, thirty-three and thirty-eight week datasets (Fig. 4d–f), with only the shallow simulated clandestine burials, and in particular the simulated modern burial with ½ clothed pig cadaver, being clearly identifiable throughout the survey period (Fig. 4).

#### 3.2. Grave soil moisture content

The excavated soil from the simulated clandestine graves were analyzed following standard procedures [47] and found that the top soil moisture content varied between 0.426–0.476 (0.438 average) with the main 'grave' soil varied between 0.558–0.717 (0.643 av.). These soil moisture values were almost double those reported by authors in more temperate climate studies (e.g. [47]).

#### 3.3. Forensic botany

After four weeks of burial, surface botanical vegetation was observed to be predominantly kikuyo grass between the simulated clandestine graves (Fig. 5a). After eight weeks of burial, *Brassica-ceae* (wild radish) predominates over the simulated clandestine graves (Fig. 5b). After sixteen weeks of burial, lush *Raphanus raphanistrum* vegetation was observed over all graves (Fig. 5c) with kikuyo grass between the graves (Fig. 5d).

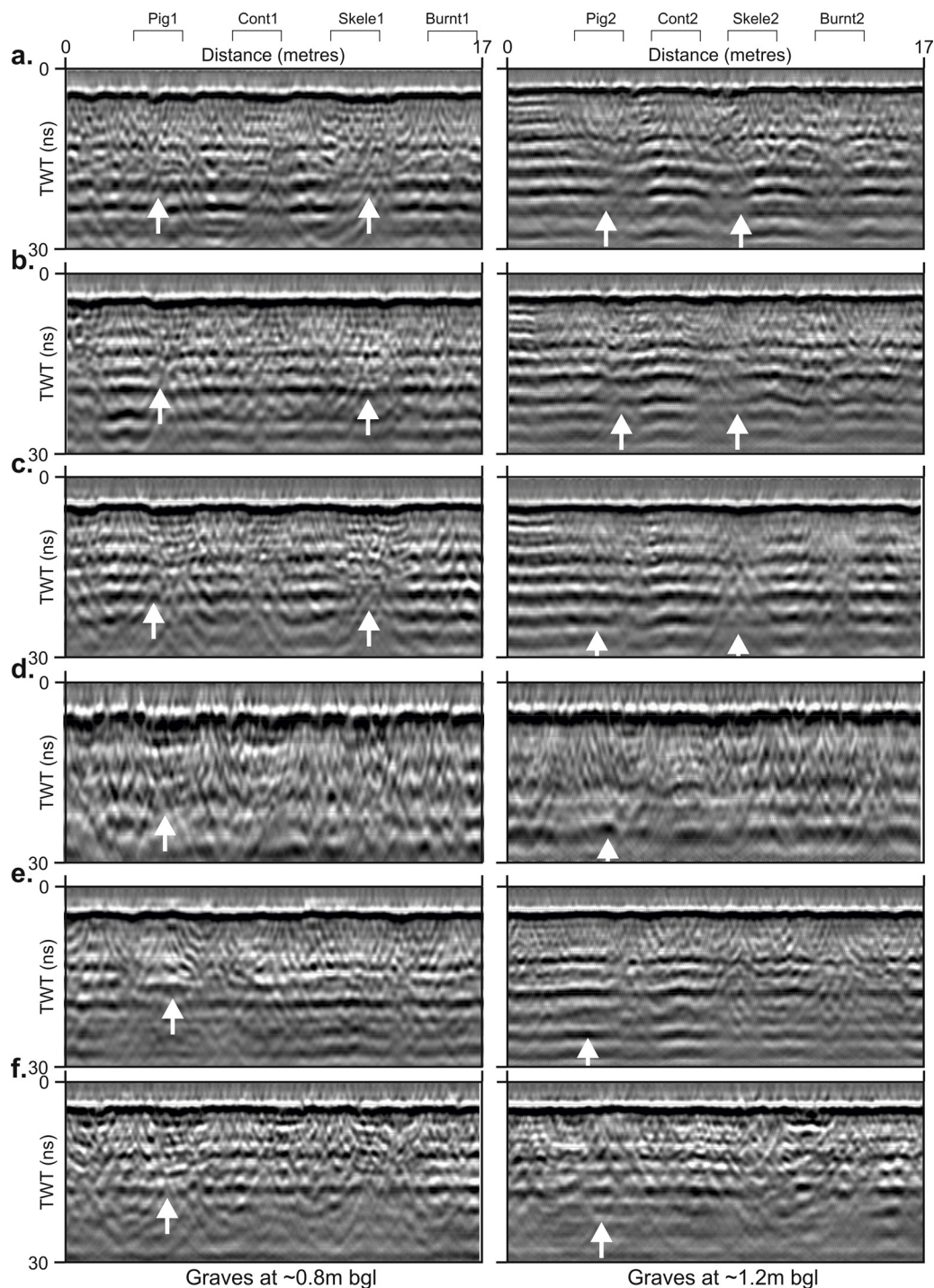
### 4. Discussion

This is the first published forensic geophysical research conducted over simulated clandestine graves in Latin America and thus has allowed some basic questions posed by forensic search teams to be addressed and indeed compared to other forensic research and case studies.

Firstly detail the several simulated clandestine grave that were established in a test site that were typically encountered by forensic search teams in rural Latin America and specifically Colombia. From this and other studies (e.g. [3–5]), it has been documented that murder victims in clandestine graves in Latin America are often ½ clothed. Other authors have noted that victims in discovered clandestine graves were either naked or fully clothed/wrapped in plastic (e.g. see [63,64]). Not having the body wrapped may allow greater access by insects and thus forensic entomology may prove more useful in Latin America as other researchers have started to document (e.g. [55–57]). Having murder victim's remains beheaded and burnt, whilst common in Latin America, is not common elsewhere, but nonetheless is important to be included for comparative purposes for forensic search teams. This study also used human remains which is still relatively unusual in geophysical monitoring of simulated grave control studies.

Secondly the results of GPR sequential monitoring over these simulated clandestine graves over 9 months will be detailed and compared to other studies.

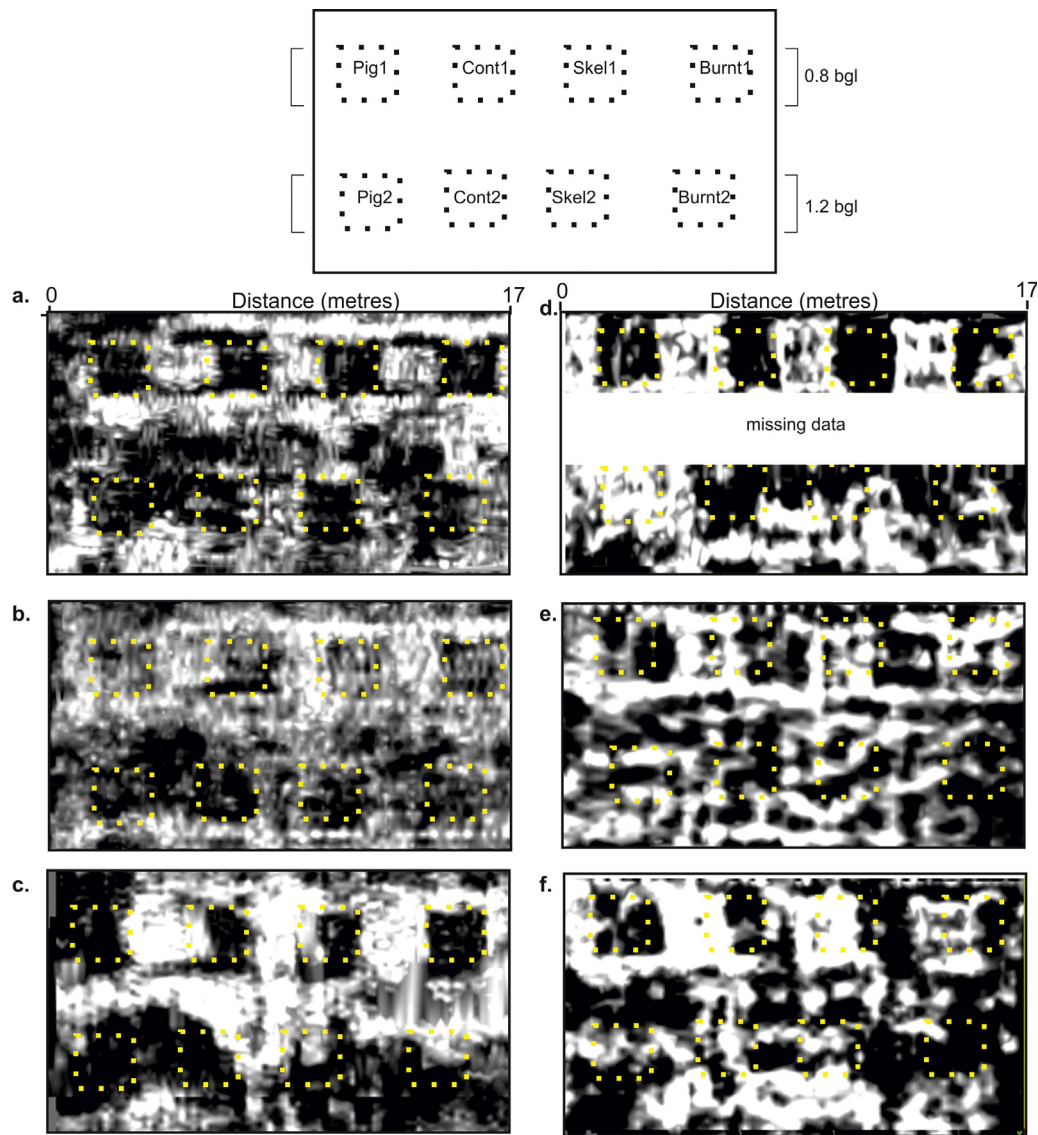
For the 2D profiles, firstly the simulated modern clandestine graves with pigs as murder victim analogues generally showed variable gpr survey results, with subtle half hyperbolic reflection events which had progressively less signal amplitudes for the longer post-burial survey dates (see Pig1/2 in Fig. 3). This was in contrast to other simulated burial studies in similar depositional



**Fig. 3.** Sequential selected GPR 250 MHz 2D profiles taken over the simulated clandestine grave sites, showing; (a) 4 weeks, (b) 15 weeks, (c) 19 weeks, (d) 22 weeks, (e) 33 weeks and, (f) 38 weeks post-burial respectively. Buried simulated named grave (see Table 1 for detail) positions, burial depths bgl and any resulting  $\frac{1}{2}$  hyperbolic reflection events (arrows) are both marked (see text for details and Fig. 2a for location).

environments and soil types that evidenced clothing/wrapping generally provides a good radar reflective surface and hence good quality GPR hyperbolic reflectors could be obtained (e.g. see [51,52]). This could be due to the plastic covering not being fully over the pig unlike other studies (e.g. [51,52]). However, bulk ground electrical resistivity techniques may be useful for forensic search teams to employ in these scenarios, as decomposition fluids are highly conductive and will not be trapped within victim clothes so will be a useful geophysical target (see [52]). Note however that

the conductivity of decompositional fluids has been shown to be temporally highly variable and it is currently thought that surveys should be optimally conducted one to two years post-burial [69]. *Secondly the simulated empty control graves* were not able to be imaged throughout the survey period, although there was a loss of signal continuity observed at this location throughout the survey period (see Cont1/2 in Fig. 3). This agrees with other studies (see, e.g. [51,52]) where the soil disturbance present in control graves becomes progressively harder to image post-emplacment. *Thirdly*



**Fig. 4.** Sequential GPR 250 MHz 2D horizontal time slice taken over the simulated clandestine grave sites, showing: (a) 4 weeks, (b) 15 weeks, (c) 19 weeks, (d) 22 weeks, (e) 33 weeks and, (f) 38 weeks post-burial respectively. Buried simulated named grave (see Table 1 for detail) positions and depths bgl shown at top (see text for details and Fig. 2a for location).

the simulated historic clandestine graves with skeletonized remains were poorly imaged in gpr surveys in 2D profiles up to nineteen weeks post-burial, but were not able to be identified after this time period (see Skel1/2 in Fig. 3). It was suggested that the small size of the skeletonized remains, the depth of burial and relatively small contrast of dielectric permittivity between the human remains and the surrounding soil which make such target locations difficult to identify using this technique. This has also been observed in historic unmarked human burials in graveyards and cemeteries (see [70,71]). However it was felt important to simulate as it was a common burial scenario in Latin America and there are no published simulated burial geophysical monitoring studies using human remains. Finally the simulated historic clandestine graves with beheaded and burnt human remains were not able to be imaged by gpr surveys in 2D profiles throughout the survey period and were worse than the purely skeletonized remains (see burnt1/2 in Fig. 3). This was thought due to the smallest geophysical target, the depth of burial and relatively small contrast of dielectric permittivity between the human remains and the surrounding

soil. It is suggested that perhaps magnetic geophysical methods may be useful to detect such burnt human remains as [68] successfully located Anglo-Saxon remains using this method and [72] shows magnetic susceptibility was a good detection technique to detect various simulated forensic targets although this has not been undertaken in this study.

For the horizontal time slice datasets, these were surprisingly good up to nineteen weeks post-burial, with all burial positions being able to be identified in contrast to the 2D profile results (Figs. 3 and 4). These good early monitoring time slice results could be argued to be due to gpr imaging the replaced disturbed soil in the simulated graves rather than the burial targets themselves as [51] observed in a similar soil type. However, there the imaged anomalies in subsequent time slice datasets were generally poor, with only the shallow burial with the modern simulated clandestine grave with ½ clothed pig cadaver being reasonably well defined (Fig. 4d–f). These latter results were most likely due to soil compaction reducing the dielectric permittivity contrast of the grave soils versus the



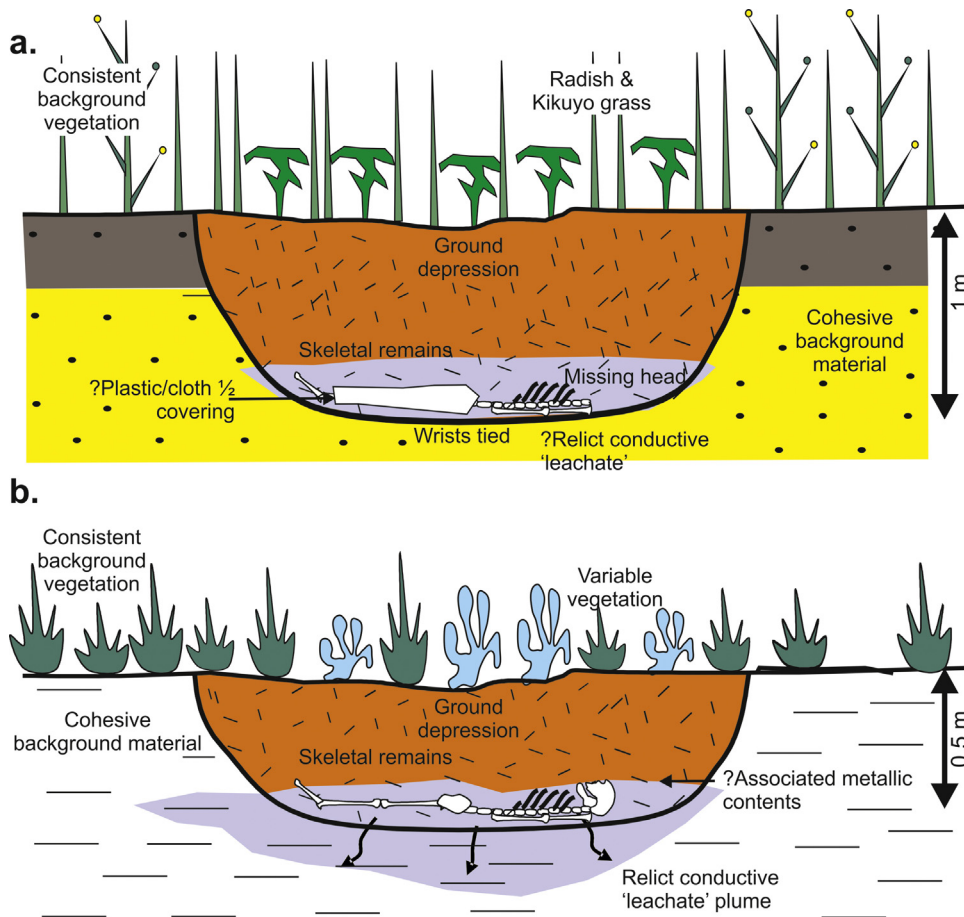
**Fig. 5.** Sequential photographs of surface botany over simulated clandestine graves. (a) No vegetation after 4 weeks of burial. (b) *Brassicaceae* (wild radish) preferentially growing over graves after 8 weeks of burial. (c) Lush vegetation (*Raphanus raphanistrum*) growing over simulated clandestine graves after 16 weeks of burial and (d) kikuyu grass growing between simulated graves.

background soil environment, as well as the relatively small physical size of the buried simulated targets making them more difficult to image. However note the importance of collecting 2D GPR profiles of suspected burial sites in both north-south and east-west orientations and the rural nature of the controlled test site environment that made the time slices image the simulated targets a lot better than simply analyzing individual 2D GPR profiles alone. This would also be important in geophysical surveys to locate unmarked burials in graveyards, burial grounds and cemeteries if time allowed as most radar surveys only collect 2D profiles in one orientation (e.g. see [70]).

Thirdly the results of simple 'grave' soil moisture content analysis and surface botanical variations observed will be documented. Simple analysis of excavated 'grave' soil indicated high (>50%) soil moisture content that was around double from that reported from temperate climate studies (e.g. [47]). This may have important implications for the rate of decomposition, it has been widely reported that decomposition rates increase with temperature (e.g. see [73]) but not that of soil moisture content,

this may prove of interest for further research. Rainfall rate variation between control test sites has shown to be important variable of measured conductivity values of decompositional fluids (see [69]). The observed variations in surface botanical vegetation of Kikuyu grass, *Brassicaceae* and *Raphanus raphanistrum* (see Fig. 5) indicated the secondary succession where primary vegetation had been replaced by the burials. These secondary vegetation succession variations have been observed in other environments, for example, *Imperata* grasslands in South-East Asia [74], grasses and *Asphodel* herbaceous perennials in semi-arid Mediterranean countries [75], and *Urtica* Nettle annuals and early flowering perennials in Western European countries [76]. These will be important potential investigatory sites for forensic search teams to identify in this depositional environment, especially where the post-burial date is short and less than 9 months like this study.

A schematic figure (Fig. 6) summarizes the typical clandestine burial scenario encountered in Latin America and contrasts this with those shown in temperate northern hemisphere climates for the readers information.



**Fig. 6.** Schematic annotated diagrams of (a) typical clandestine grave encountered in (a) Latin America and (b) temperate northern hemisphere scenarios  
Source: Modified from [17].

## 5. Conclusions

Simulated clandestine graves commonly encountered in Latin America have been created on control test sites outside of Bogotá, Colombia. These have included using 1/2 clothed pig cadavers as 'fresh' graves, historic graves using donated skeletonized human remains and beheaded and burnt donated skeletonized human remains.

Sequential monitoring of the simulated clandestine graves over 9 months by 250 MHz GPR on 2D profiles showed that the pig cadavers could be imaged up to 7 months after burial, but the skeletonized remains were poorly imaged and the beheaded and burnt remains were poorly detected throughout the survey period, most probably due to a weak dielectric permittivity contrast between the skeletal remains and the surrounding soil. In contrast, the horizontal time slices showed generally good imaging of all of the simulated clandestine graves, probably due to a combination of the contrast between the disturbed grave soil and the background rural environment and the 2D GPR profiles being collected in both orientations over the survey area.

Soil moisture contents of over 50% were observed in the simulated clandestine graves and may be an important variable that has not been reported elsewhere. The secondary succession surface vegetation variations documented will prove very useful for forensic botanists searching for clandestine graves that are less than 1 year old in such depositional environments.

Observations of the botanical species variations of secondary succession over the simulated clandestine graves have been identified in such rural Latin American environments and should

prove to be important to identify for forensic search teams to identify potential burial site(s).

Further work should extend the sequential GPR monitoring period to several years post-burial in order to give forensic investigators databases to compare their results to and perhaps see if the observed temporal changes continue. It is also suggested that magnetic surveys be undertaken to determine if this technique could resolve the beheaded and burnt human remains. 'Grave' soil should also be extracted and analyzed to determine if human-specific compounds could be detected and, if so, could be used in this environment as an additional complementary forensic search detection tool.

## Role of the funding source

There was no involvement of any funding sources with this project.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the Universidad Nacional de Colombia for permission to undertake the study. The Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses is acknowledged for giving time for the lead author to undertake research and GeoSense for loan of the GPR equipment and data processing assistance. Equitas is thanked for supplying respective financial and logistical support for field work. The Colombian Association for Forensic Anthropology is thanked for donation of human remains

used during this study during a historical archaeological rescue (ACAF 031–12). A Santander fellowship in collaboration with Keele University funded a short research exchange programme for the lead author. The Instituto Geográfico Agustín Codazzi is acknowledged for doing soil analysis and finally the Centro de Investigación Tibaitatá-IDEAM is thanked for providing meteorological datasets.

## References

- [1] Proyecto Desaparecidos. Por la Memoria, la Verdad y la Justicia, 2014 Available from: <http://www.desaparecidos.org> (accessed 24.05.14).
- [2] National Institute of Legal Medicine and Forensic Sciences, Colombia. Available from: [www.medicinalegal.gov.co](http://www.medicinalegal.gov.co) (accessed 14.04.14).
- [3] H.E. Solla, M.Y. Işcan, Skeletal remains of Dr Eugenio Berrios Sagredo, *Forensic Sci. Int.* 116 (2001) 201–211.
- [4] M.Y. Işcan, H.E. Solla, B.Q. McCabe, Victim of a dictatorial regime: identification of Mr Roberto Gomensoro Josman, *Forensic Sci. Int.* 151 (2005) 213–220.
- [5] C.G. Varas, M.I. Leiva, Managing comingled remains from mass graves: considerations, implications and recommendations from a human rights case in Chile, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e19–e24.
- [6] A. Ruffell, A. McCabe, C. Donnelly, B. Sloan, Location and assessment of an historic (150–160 years old) mass grave using geographic and ground penetrating radar investigation, *NW Ireland, J. Forensic Sci.* 54 (2009) 382–394.
- [7] A. Witten, R. Brooks, T. Fenner, The Tulsa race riot of 1921: a geophysical study to locate a mass grave, *Lead. Edge* 20 (2000) 655–660.
- [8] L. Ríoz, J.I.C. Overjero, J.P. Prieto, Identification process in mass graves from the Spanish Civil War I, *Forensic Sci. Int.* 199 (2010) e27–e36.
- [9] L. Ríoz, A. García-Rubio, B. Martínez, A. Alonso, J. Puente, Identification process in mass graves from the Spanish Civil War II, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e4–e9.
- [10] S. Fiedler, J. Berger, K. Stahr, M. Graw, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller (Eds.), *Localisation of a Mass Grave from the Nazi Era—A Case Study*, Springer Publishers, 2009, pp. 303–314.
- [11] A. Ossokowski, M. Kuś, P. Brzeziński, J. Prüffer, J. Piątek, G. Zielińska, et al., Example of human individual identification from World War II gravesite, *Forensic Sci. Int.* 233 (2013) 179–192.
- [12] L. Szleszkowski, A. Thannhäuser, K. Szważyk, P. Konczewski, J. Kawecki, B. Świątek, Exhumation research concerning the victims of political repressions in 1945–1956 in Poland: a new direction in forensic medicine, *Forensic Sci. Int.* 235 (2014) e1–e6.
- [13] Independent Commission for the Location of Victims Remains, 2014 Available from: <http://www.iclvr.ie/> (accessed 26.04.14).
- [14] A.G. Brown, The use of forensic botany and geology in war crimes investigations in NE Bosnia, *Forensic Sci. Int.* 163 (2006) 204–210.
- [15] M. Dajuric, D. Dunjic, D. Djonc, M. Skinner, Identification of victims from two mass-graves in Serbia: a critical evaluation of classical markers of identity, *Forensic Sci. Int.* 172 (2007) 125–129.
- [16] Syrian Observatory for Human Rights, 2014 Available from: [www.syriaohr.com](http://www.syriaohr.com) (accessed 24.04.14).
- [17] J.K. Pringle, A. Ruffell, J.R. Jervis, J.D. Donnelly, J. McKinley, J.D. Hansen, R. Morgan, D. Pirrie, M. Harrison, The use of geoscience methods for terrestrial forensic searches, *Earth Sci. Rev.* 114 (2012) 108–123.
- [18] R. Parker, A. Ruffell, D. Hughes, J. Pringle, Geophysics and the search of freshwater bodies: a review, *Sci. Justice* 50 (2010) 141–149.
- [19] M. Kalacska, L.S. Bell, G.A. Sanchez-Azofeifa, T. Caelli, The application of remote sensing for detecting mass graves: an experimental animal case study from Costa Rica, *J. Forensic Sci.* 54 (2009) 159–166.
- [20] A. Ruffell, J. McKinley, *Forensic geomorphology*, *Geomorphology* 206 (2014) 14–22.
- [21] M. Harrison, L.J. Donnelly, Locating concealed homicide victims: developing the role of geoforensics, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller (Eds.), *Criminal and Environmental Soil Forensics*, Springer, 2009, pp. 197–219.
- [22] D.O. Larson, A.A. Vass, M. Wise, Advanced scientific methods and procedures in the forensic investigation of clandestine graves, *J. Contemp. Crim. Justice* 27 (2011) 149–182.
- [23] I. Aquila, F. Ausania, C. Di Nunzio, A. Serra, S. Boca, A. Capelli, et al., The role of forensic botany in crime scene investigation: case report and review of literature, *J. Forensic Sci.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1111/1556-4029.12401>.
- [24] H.M. Coyle, *Forensic Botany: Principles and Applications to Criminal Casework*, CRC Press, 2005.
- [25] D. Gennard, *Forensic Entomology: An Introduction*, 2nd ed., Wiley-Blackwell, 2012.
- [26] J. Amendt, C.P. Campobasso, E. Gaudry, C. Reiter, H.N. LeBlanc, M.J.R. Hall, Best practice in forensic entomology: standards and guidelines, *Int. J. Legal Med.* 121 (2007) 90–104.
- [27] A. Lasseter, K.P. Jacobi, R. Farley, L. Hensel, Cadaver dog and handler team capabilities in the recovery of buried human remains in the Southeastern United States, *J. Forensic Sci.* 48 (2003) 1–5.
- [28] T.L. Dupras, J.J. Schultz, S.M. Wheeler, L.J. Williams, *Forensic Recovery of Human Remains*, CRC Press, 2006.
- [29] E.W. Killam, *The Detection of Human Remains*, Charles C Thomas Publisher, Springfield, USA, 2004.
- [30] A. Ruffell, Burial location using cheap and reliable quantitative probe measurements, *Forensic Sci. Int.* 151 (2005) 207–211.
- [31] D.W. Owsley, Techniques for locating burials, with emphasis on the probe, *J. Forensic Sci.* 40 (1995) 735–740.
- [32] A.A. Vass, R.R. Smith, C.V. Thompson, M.N. Burnett, N. Dulgerian, B.A. Eckenrode, Odor analysis of decomposing human remains, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 384–391.
- [33] D.O. Carter, D. Yellowlees, M. Tibbett, Using ninhydrin to detect gravesoil, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 397–400.
- [34] J. Dekeirsschieter, F.J. Verheggen, M. Gohy, F. Hubrecht, L. Bourguignon, G. Lognay, et al., Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus*) in different biotopes, *Forensic Sci. Int.* 189 (2009) 46–53.
- [35] D.L. France, T.J. Griffin, J.G. Swanburg, J.W. Lindemann, G.C. Davenport, V. Trammell, et al., A multidisciplinary approach to the detection of clandestine graves, *J. Forensic Sci.* 37 (1992) 1445–1458.
- [36] K. Powell, Detecting human remains using near-surface geophysical instruments, *Expl. Geophys.* 35 (2004) 88–92.
- [37] D.C. Nobes, The search for “Yvonne”: a case example of the delineation of a grave using near-surface geophysical methods, *J. Forensic Sci.* 45 (2000) 715–721.
- [38] P. Cheetham, Forensic geophysical survey, in: J. Hunter, M. Cox (Eds.), *Forensic Archaeology: Advances in Theory and Practice*, Routledge, 2005, pp. 62–95.
- [39] A. Ruffell, Searching for the IRA “disappeared”: ground penetrating radar investigation of a churchyard burial site, *J. Forensic Sci.* 50 (2005) 1430–1435.
- [40] J.J. Schultz, Using ground-penetrating radar to locate clandestine graves of homicide victims: forming forensic archaeology partnerships with law enforcement, *Homicide Stud.* 11 (2007) 15–29.
- [41] J.K. Pringle, J.R. Jervis, Electrical resistivity survey to search for a recent clandestine burial of a homicide victim, UK, *Forensic Sci. Int.* 202 (2010) e1–e7.
- [42] A. Novo, H. Lorenzo, F. Ria, M. Solla, 3D GPR in forensics: finding a clandestine grave in a mountainous environment, *Forensic Sci. Int.* 204 (2011) 134–138.
- [43] K.B. Strongman, Forensic applications of ground penetrating radar, in: J. Pilon (Ed.), *Ground penetrating radar*, *Geol. Surv. Canada Paper* 90-4 (1992) 203–211.
- [44] J.J. Schultz, M.E. Collins, A.B. Falsetti, Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 51 (2006) 607–616.
- [45] J.K. Pringle, J. Jervis, J.P. Cassella, N.J. Cassidy, Time-lapse geophysical investigations over a simulated urban clandestine grave, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 1405–1417.
- [46] J.J. Schultz, Sequential monitoring of burials containing small pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 279–287.
- [47] J.R. Jervis, J.K. Pringle, G.W. Tuckwell, Time-lapse resistivity surveys over simulated clandestine graves, *Forensic Sci. Int.* 192 (2009) 7–13.
- [48] A. Juerges, J.K. Pringle, J.R. Jervis, P. Masters, Comparisons of magnetic and electrical resistivity surveys over simulated clandestine graves in contrasting burial environments, *Near Surf. Geophys.* 8 (2010) 529–539.
- [49] J.J. Schultz, M.M. Martin, Controlled GPR grave research: comparison of reflection profiles between 500- and 250-MHz antennae, *Forensic Sci. Int.* 209 (2011) 64–69.
- [50] J.K. Pringle, C. Holland, K. Szkornik, M. Harrison, Establishing forensic search methodologies and geophysical surveying for the detection of clandestine graves in coastal beach environments, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e29–e36.
- [51] J.J. Schultz, M.M. Martin, Monitoring controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar, *J. Appl. Geophys.* 83 (2012) 74–89.
- [52] J.K. Pringle, J.R. Jervis, J.D. Hansen, N.J. Cassidy, G.M. Jones, J.P. Cassella, Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and ground penetrating radar methods: 0–3 years, *J. Forensic Sci.* 57 (2012) 1467–1486.
- [53] J.D. Hansen, J.K. Pringle, Comparison of magnetic, electrical and GPR surveys to detect buried forensic objects in semi-urban and domestic patio environments, in: D. Pirrie, A. Ruffell, L.A. Dawson (Eds.), *Environmental & Criminal Geoforensics*, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 384 (2013) 229–251.
- [54] A. Ruffell, J.K. Pringle, S. Forbes, Search protocols for hidden forensic objects beneath floors and within walls, *Forensic Sci. Int.* 237 (2014) 137–145.
- [55] A.C.G. Meyer, S.D. Vasconcelos, Necrophagus beetles associated with carcasses in a semi-arid environment in Northeastern Brazil: implications for forensic entomology, *Forensic Sci. Int.* 226 (2013) 41–45.
- [56] N.A. Segura, W. Usaquén, M.C. Sánchez, L. Chuaire, F. Bello, Succession pattern of cadaverous entomofauna in a semi-rural area of Bogotá, Colombia, *Forensic Sci. Int.* 187 (2009) 66–72.
- [57] M.Y. Işcan, H.E.S. Olivera, *Forensic anthropology in Latin America*, *Forensic Sci. Int.* 109 (2000) 15–30.
- [58] A.H. Ross, S.L. Cunningham, Time-since-death and bone weathering in a tropical environment, *Forensic Sci. Int.* 204 (2011) 126–133.
- [59] C.M. Molina, O. Hernandez, J. Pringle, Experiments to detect clandestine graves from interpreted high resolution geophysical anomalies, in: *Proc. Meeting of Americas, AGU, Cancun, México, 14–17 May, 2013*.
- [60] Centro Agropecuario Marengo at the Universidad Nacional de Colombia, 2014 Available from: <http://www.marengo.unal.edu.co> (accessed 30.04.14).
- [61] D.O. Carter, M. Tibbett, Cadaver decomposition and soil: processes, in: M. Tibbett, D.O. Carter (Eds.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy: Chemical and Biological Effects of Buried Human Remains*, CRC Press, 2009, pp. 29–52.
- [62] M. de Osorio, Ética en la investigación con modelos animales experimentales, Alternativas y las 3 Rs de Russel, Una responsabilidad y un compromiso ético que nos compete a todos, 2006, 163–183.
- [63] M.H. Manhein, Decomposition rates of deliberate burials: a case study of preservation, in: W.D. Haglund, M.H. Sorg (Eds.), *Forensic Taphonomy: The Post-mortem Fate of Human Remains*, CRC Press, 1996, pp. 469–481.
- [64] J. Hunter, M. Cox, *Forensic Archaeology: Advances in Theory and Practice*, Routledge, 2005.



- [65] Fiscalía General de la Nación. Available from: <http://www.fiscalia.gov.co> (accessed 30.04.14).
- [66] Centro Nacional de Memoria Histórica. Available from: <http://www.centrodehistoriahistorica.gov.co> (accessed 30.04.14).
- [67] Herbario Nacional Colombiano. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, 1980.
- [68] N. Linford, Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves, *Archaeol. Prospect.* 11 (2004) 167–180.
- [69] J.K. Pringle, J.P. Cassella, J.R. Jervis, A. Williams, P. Cross, N.J. Cassidy, Soilwater conductivity analysis to date and locate clandestine graves of homicide victims, *J. Forensic Sci.* (2015) (in press).
- [70] J.D. Hansen, J.P. Pringle, J. Goodwin, GPR and bulk ground resistivity surveys in graveyards: locating unmarked burials in contrasting soil types, *Forensic Sci. Int.* 237 (2014) e14–e29.
- [71] J.A. Doolittle, N.F. Bellantoni, The search for graves using ground-penetrating radar in Connecticut, *J. Archaeol. Sci.* 37 (2010) 941–949.
- [72] J.K. Pringle, K. Wisniewski, M. Giubertoni, N.J. Cassidy, J.D. Hansen, N.J. Linford, R.M. Daniels, The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool, *Forensic Sci. Int.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.10.046>.
- [73] D.O. Carter, D. Yellowlees, M. Tibbett, Temperature affects microbial decomposition of cadavers (*Rattus rattus*) in contrasting soils, *Appl. Soil Ecol.* 40 (2008) 129–137.
- [74] I. Yassir, J. Van der Kamp, P. Buurman, Secondary succession after fire in Imperata grasslands of East Kalimantan, Indonesia, *Agric. Ecosyst. Environ.* 137 (2010) 172–182.
- [75] A. Bonet, Secondary succession of semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: insights into conservation and restoration of degraded lands, *J. Arid. Environ.* 56 (2004) 213–233.
- [76] S.A. Corbet, Insects, plants and succession: advantages of long-term set-aside, *Agric. Ecosyst. Environ.* 53 (1995) 201–217.



# Geophysical monitoring of simulated graves with resistivity, magnetic susceptibility, conductivity and GPR in Colombia, South America



Carlos Martin Molina<sup>a,\*</sup>, Jamie K. Pringle<sup>b</sup>, Miguel Saumett<sup>c</sup>, Gethin T. Evans<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia y Laboratorio de Evidencia Traza, Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, Bogotá, Colombia

<sup>b</sup> School of Physical Sciences & Geography, Keele University, Staffordshire, ST5 5BG, UK

<sup>c</sup> GeoSense, Carrera 7 # 127-48 Of. 1007, Bogotá, Colombia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 6 July 2015

Received in revised form 14 December 2015

Accepted 6 February 2016

Available online 17 February 2016

### Keywords:

Forensic science

Forensic geophysics

Simulated grave

Monitoring

Ground penetrating radar

Magnetic susceptibility

Conductivity

Resistivity

## ABSTRACT

In most Latin American countries there are significant numbers of both missing people and forced disappearances, ~71,000 Colombia alone. Successful detection of buried human remains by forensic search teams can be difficult in varying terrain and climates. Three clandestine burials were simulated at two different depths commonly encountered in Latin America. In order to gain critical knowledge of optimum geophysical detection techniques, burials were monitored using: ground penetrating radar, magnetic susceptibility, bulk ground conductivity and electrical resistivity up to twenty-two months post-burial. Radar survey results showed good detection of modern 1/2 clothed pig cadavers throughout the survey period on 2D profiles, with the 250 MHz antennae judged optimal. Both skeletonised and decapitated and burnt human remains were poorly imaged on 2D profiles with loss in signal continuity observed throughout the survey period. Horizontal radar time slices showed good anomalies observed over targets, but these decreased in amplitude over the post-burial time. These were judged due to detecting disturbed grave soil rather than just the buried targets. Magnetic susceptibility and electrical resistivity were successful at target detection in contrast to bulk ground conductivity surveys which were unsuccessful. Deeper burials were all harder to image than shallower ones. Forensic geophysical surveys should be undertaken at suspected burial sites.

© 2016 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

In many South American countries there are significant numbers of people both missing and those who have been subjected to forced disappearances [1]. In Colombia there are currently ~71,000 people missing, of whom it has been estimated that ~21,000 are forced disappearances [2]. Clandestine grave victims discovered in South America have been reported to be isolated [3,4], co-mingled and mass burial styles [5], at different burial depths below ground level and in a variety of depositional environments [3–5]. Other relevant published case studies of atrocity victims have been reported, for example, in 19th Century Irish mass burials [6], USA race riot victims [7], Spanish Civil War mass burials [8–10], World War Two burials [11,12], in post-WW2 Polish repression mass burials [13], the Northern Ireland ‘Troubles’

albeit mostly isolated burials [14], the 1990s Balkan wars mass burials [15,16], and sadly in current civil wars with both isolated and mass burials [17].

Current forensic search methods to detect both isolated and mass clandestine burials of murder victims are highly varied and have been reviewed elsewhere [18,19], with best practice suggesting a phased approach, moving from large-scale remote sensing methods [20] to initial site reconnaissance [21] and control studies before full ground searches are initiated [22,23]. These full searches have also involved a variety of methods, including forensic geomorphology [21], forensic botany [24,25] and entomology [26,27], scent-trained search dogs [28,29], physical probing [30–32], thanatochemistry from soil samples [33–35] and near-surface geophysical investigations [36–43].

Recent forensic geophysical research has used simulated clandestine graves to work out optimal detection methods and equipment configurations. Results have been found to be highly variable, depending upon a host of factors, the most important determined are time since burial, burial style, local soil type, vegetation and climate [36,44–56]. There has been little research in South America using controlled test experiments, with [57]

\* Corresponding author. Tel.: +57 3002 121736.

E-mail addresses: [cmmolinaga@unal.edu.co](mailto:cmmolinaga@unal.edu.co),

[cmolina@medicinallegal.gov.co](mailto:cmolina@medicinallegal.gov.co) (C.M. Molina), [j.k.pringle@keele.ac.uk](mailto:j.k.pringle@keele.ac.uk) (J.K. Pringle), [miguel.saumett@geosenservices.com](mailto:miguel.saumett@geosenservices.com) (M. Saumett).

reporting ground penetrating radar (GPR) results from monitoring controlled burials over a period of nine months. This paper presents results of GPR, surface magnetic susceptibility, bulk ground conductivity and electrical resistivity datasets from ten months to twenty-two months post-burial. Brief discussions on these techniques in forensic searches are now given.

GPR is one of the most popularly employed pieces of geophysical equipment being used in searches by professional search teams and practitioners [18]. GPR has been successful in detecting forensic targets in numerous controlled experiments [36,44–55,57] and criminal cases [40,41,46,55]. However it may not be optimal in all depositional conditions [8,47,48], which include saline soils [51], wet clay [42] or burial style [53].

Magnetic susceptibility is an emerging technique and measures materials that are susceptible to being magnetised, with measurements generating an AC magnetic field of low intensity, making both positive and negative susceptibilities [54]. This reading usually increases by combining magnetic minerals such as magnetite and ferromagnetic materials with manmade material [58]. The use of magnetic susceptibility for forensic purposes has been successful in buried target detection [59] in simulated environments [46,54,60], and to differentiate soil samples [61,62].

Bulk ground conductivity is a relatively quick field technique to measure relative changes in ground conductivity between targets and background readings by inducing an electro-magnetic current [18,63]. Although more widely used in environmental forensics [18,63], it has had mixed results in criminal searches [18,38,64,65]; controlled studies have determined that the depositional environments have been deemed to be very important, with searches in urban environments found to be particularly problematic for successful target detection [61,66]. Decompositional fluids have also been found to be detectable with this method but are temporally variable [56]. Electrical resistivity is the reciprocal of conductivity and has been widely used in environmental forensics [18,63], detection of clandestine graves [42], ancient burials [66–68] and in controlled experiments [36,39,46,48,51,53], however, major depositional environment variables can affect target detection, including soil moisture [69,70], soil type [18,70] and salinity [51].

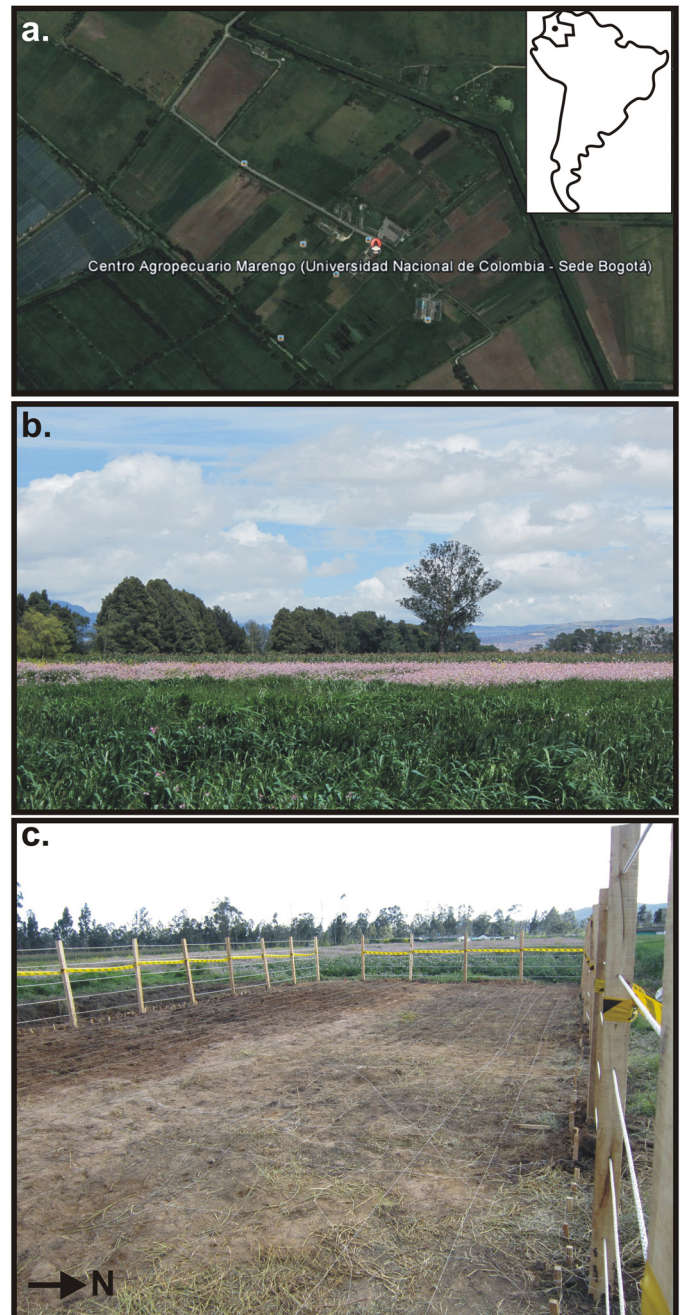
This paper presents results of GPR, surface magnetic susceptibility, bulk ground conductivity and electrical resistivity surveys over controlled burials in Colombia, South America in a rural depositional environment, from ten months to twenty-two months post-burial. GPR results from zero to nine months post-burial were reported in [57]. The research aims were: *firstly*, to assess whether these methods could detect the simulated graves, *secondly*, to determine if there was an optimal time for surveying post-burial and *thirdly*, to compare results to other studies.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study site

The experimental site is located in a rural area of the Marengo Agricultural Center of the National University of Colombia ~14 km north of the capital Bogota (Fig. 1a). The study site was in a rural neo-tropical environment with dense vegetation that was cleared, typical of those encountered away from coastal areas in Colombia (Fig. 1b). The site was situated ~2500 m above sea level. Geologically the site is underlain by fluvial-lacustrine deposits of the Sabana Formation of Middle and Late Pleistocene age. The local soil type is a red clay-rich andisol loam, formed from lacustrine sediments and volcanic ash (Fig. 1c), with an organic topsoil horizon ~5 cm to ~60 cm thick.

The Tibaitatá Centre for Agricultural research had a meteorological weather observation station ~1 km from the test site, which continually recorded rainfall and temperature data. The site was



**Fig. 1.** (a) Aerial photograph of the Marengo Agricultural Center of the National University of Colombia with location (inset). (b) General site photograph. (c) Fenced test site with cleared vegetation photograph. Modified from [57].

observed to have an average temperature of 14 °C and annual rainfall rates of between 500 mm and 1000 mm per year [71] with little seasonal variation as would be expected in this latitude.

### 2.2. Simulated graves

It was decided to use freshly dispatched domestic pig cadavers to simulate clandestine graves of murder victims as they are commonly used in such monitoring experiments [45–50], comprising similar chemical compositions, body size, tissue:body fat ratios and skin/hair types to humans [53]. The National Charter for the Protection of Animals (1989) covers biomedical use of animals in Colombia (Ministry of Health, 1993). For this study it was also

able to use human remains using Resolution 8430 of the Colombian Ministry of Health Act (1993). Donated skeletonised remains were used to represent historic clandestine graves after a historical archaeological rescue by the Colombian Association of Forensic Anthropology (ACAF), as the time frame that modern human remains would take to skeletonise would be too long for this study, typically months to years post-burial. The National University of Colombia Faculty of Science ethics committee had also approved the project.

Eight simulated clandestine graves were excavated on 19th June 2013 (see Table 1). For each grave, the overlying vegetation was removed and c. 2 m × 2 m holes were dug in a regular pattern (Fig. 2a). Four graves were dug to ~0.8 m below ground level (bgl) and four dug to ~1.2 m bgl respectively, these depths have been commonly encountered in discovered clandestine graves in Colombia [57]. Two simulated graves (Pig1/2) at 0.8 m and 1.2 m bgl had been humanely dispatched (electrocuted and bled <6 h before burial) ~70 kg domestic pig carcasses procured from a local butcher emplaced in the centre, with them both having their lower half wrapped with cloth as discovery of half-naked remains are a common burial scenario in Colombia [72]. Best practice was followed on the use of animals, namely non-conscious, minimal numbers and also minimizing any pain and/or discomfort [73]. It was unfortunate that animals were bled prior to burial as the lack of blood may reduce any subsequent leachate plume from developing and results would, most likely, be different to an intact cadaver. A further two graves (Cont1/2) were empty acting as control and were refilled by the excavated soil. The next two graves (Skel1/2) contained the simulated historic skeletonised human remains together with various small arms shell casings and the final two graves (Burnt1/2) contained the simulated historic beheaded and burnt skeletonised human remains, these burial style scenarios sadly are also common in Colombia [74]. Note that obviously the soil will be freshly disturbed, will most probably have higher porosities and will not contain decompositional products as might be expected from true historic graves but these were deemed important to provide a variety of burial targets in the time frame of the study. All graves were then refilled with excavated soil back to ground level. Surface botanical changes documented in [57].

### 2.3. Ground penetrating radar data collection and processing

Repeat GPR survey datasets were collected within the survey area (Fig. 2a) by a Mala™ ProEx model at c. 1-monthly intervals after burial (Table 2) continuing the surveys shown in [57]. In addition to the reported 250 MHz frequency data, 500 MHz frequency antennae datasets were also collected from nine months post-burial as the equipment became available. The 20 m × 10 m survey grid was GPR surveyed on both north-south and east-west orientated or axes, 0.25 m spaced, parallel survey lines with 0.02 m radar trace spacings throughout, using a 30 ns time window.

Once the 2D GPR profiles were acquired by the Mala RadExplorer™ data collection software, they were downloaded

and imported into GSSI's RADAN™ v6.6 data processing software. For each profile, standard sequential processing steps were undertaken as in [57] to optimise image quality. These were; (i) DC removal; (ii) time-zero adjustment to make all traces consistent, this adjustment eliminates the time zero; (iii) 2D spatial filtering; (iv) bandpass filtering to reduce noise; (v) amplitude correction to boost deeper reflection amplitudes, and; (vi) deconvolution. Once completed and with all GPR 2D profiles having their known spatial position added, horizontal time-slices of the GPR data were generated for each repeat GPR survey.

### 2.4. Magnetic susceptibility/conductivity data collection and processing

The Slingram method, in which both the primary field (transmitter coil) as the (receiving coil) move together at a constant separation (see [64,75]) was used to simultaneously obtain magnetic susceptibility and conductivity measurements with GSSI's 400 Profiler™ equipment. Data collection began after a year post-burial up until 21 months post-burial, with some monthly gaps in data collection due to equipment availability and the tropical rainy season making data collection impossible (Table 2). A 7 m × 17 m grid was collected for each survey, composed of north-south parallel lines separated every 0.5 m, with sample intervals of 0.5 m and 1 s sample position time. After initial trials and equipment calibration following best practice [18,22,23,63], the vertical component (VMD) and frequencies of 11,000 Hz, 13,000 Hz and 15,000 Hz were chosen to be optimal at the test site.

Once the data was collected onto a hand-held portable logging device and downloaded, data was input into Microsoft Excel and was (i) despiked to eliminate anomalous data outliers before exporting into Generic Mapping Tools (GMT) software to (ii) undertake detrending to remove long wavelength site trends before (iii) digital gridded, colour contoured surfaces of magnetic susceptibilities and bulk ground conductivity were both generated.

### 2.5. Electrical resistivity data collection and processing

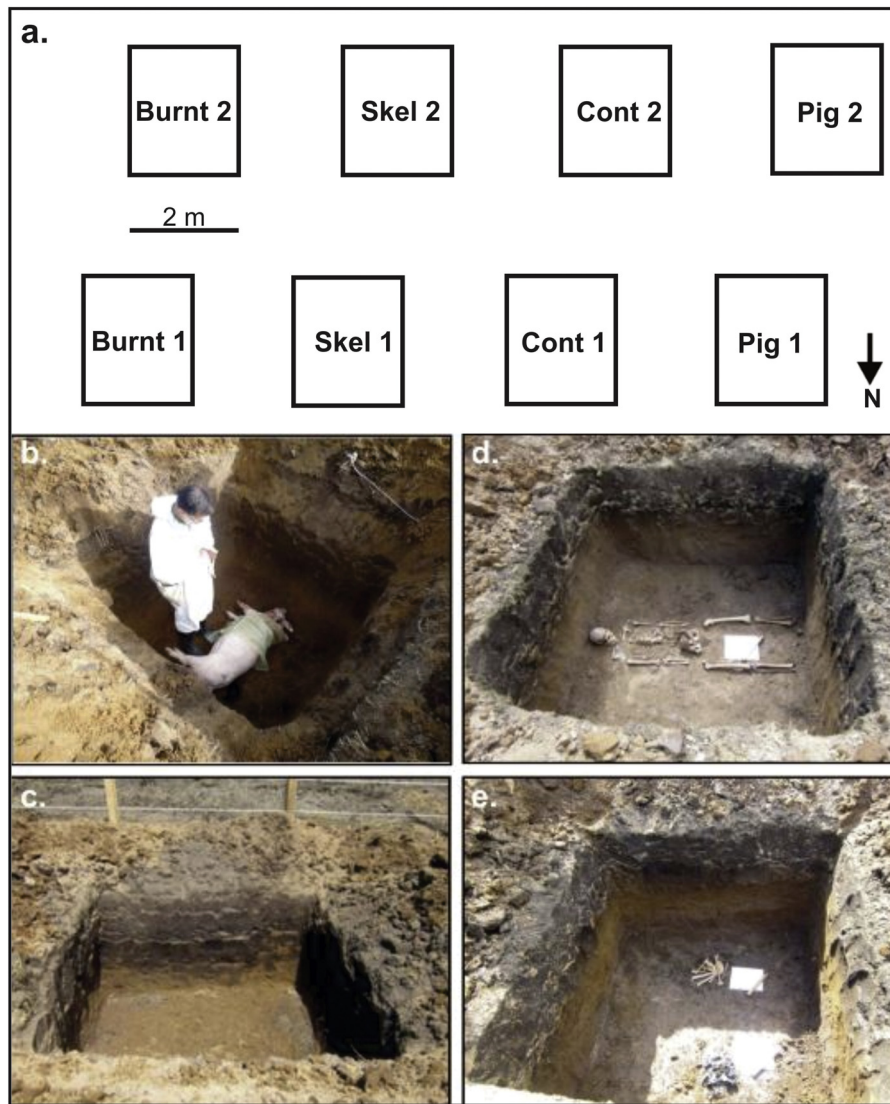
Electrical resistivity surface datasets were acquired in the same 7 m × 17 m survey grid as described in section 2.4, using a Geoelectric Abem™ Terrameter in a pole-pole mobile equipment configuration, with remote probes spaced 1 m apart and ~15 m away from the survey area following standard practice [63,69]. Datasets were collected from 12 to 21 months post-burial following equipment availability, and comprised of fifteen east-west parallel lines of 17 m in length, separated every 0.5 m, with sample intervals of 0.25 m along survey lines.

Once the data was downloaded, it was input into Microsoft Excel and (i) was despiked to eliminate anomalous data outliers before being exported into Generic Mapping Tools (GMT) software to be (ii) detrended to remove long wavelength site trends and a (iii) digital gridded, colour contoured surface was generated.

**Table 1**

Details of simulated clandestine graves emplaced at the test site with dimensions, contents and justifications all given. A1–D1 were emplaced ~0.8 m below ground level (bgl) and A2–D2 were emplaced at ~1.2 m bgl respectively (see Fig. 2 for location). Modified from [57].

Grave no.	Dimensions	Contents	Description	Justification
A1/A2	2 m × 2 m × 0.8 m/1.2 m	70 kg domestic pig carcass freshly dispatched	Bottom half wrapped in cloth	Represents 1/2 clothed common scenario
B1/B2	2 m × 2 m × 0.8 m/1.2 m	None	Dug and re-filled	Acted as control
C1/C2	2 m × 2 m × 0.8 m/1.2 m	Skeletonised human remains with 6 mm × 9 mm and 4 mm × 38 mm bullet casings	Skeleton placed in dorsal extended position	Common homicide scenario
D1/D2	2 m × 2 m × 0.8 m/1.2 m	Beheaded skeletonised and burnt human remains	Bones laid out anatomically correct	Common homicide scenario



**Fig. 2.** (a) Plan-view of control test site showing positions of eight simulated clandestine graves (annotated) with top row depths 0.8 m and bottom row 1.2 m below ground level (bgl). (b) Simulated clandestine grave with 1/2 clothed domestic pig cadaver. (c) Simulated clandestine empty grave for control. (d) Simulated historic clandestine grave with skeletonised human remains and bullet casings. (e) Simulated historic clandestine grave with beheaded and burnt skeletonised human remains. Modified from [57].

Finally (iv) R statistical software was used to create boxplot summary data graphs over the simulated grave positions by summing the 10 measurements over them (Fig. 2) and for the respective control lines.

**Table 2**  
Summary of geophysical data presented in this study.

Survey date	Survey day after burial <sup>a</sup>	Survey week after burial	Accumulated degree day (ADD)	Data acquired
26/09/2013	100	14	1303	225 MHz GPR
28/01/2014	224	32	3002	225 MHz GPR
08/04/2014	294	42	3951	225/450 MHz GPR
14/06/2014	351	50	4662	225/450 MHz GPR, Res, MS and cond
24/09/2014	463	66	6075	Res, MS and Cond
16/12/2014	546	78	7135	Res, MS and Cond
10/04/2015	661	94	8754	Res, MS and Cond

<sup>a</sup> Burial date was 19th June 2013. Accumulated degree day calculated from average daily temperature information (see text for details) but note that this is not relevant for skeletonised remains as these are not *in situ*. Res = electrical resistivity, MS = magnetic susceptibility and Cond = bulk ground conductivity surveys respectively.

### 3. Results

#### 3.1. Ground penetrating radar

Selected GPR 250 MHz (Fig. 3a) and 500 MHz (Fig. 3b) 2D profiles acquired through the survey period are shown (see Fig. 2a for respective profile locations).

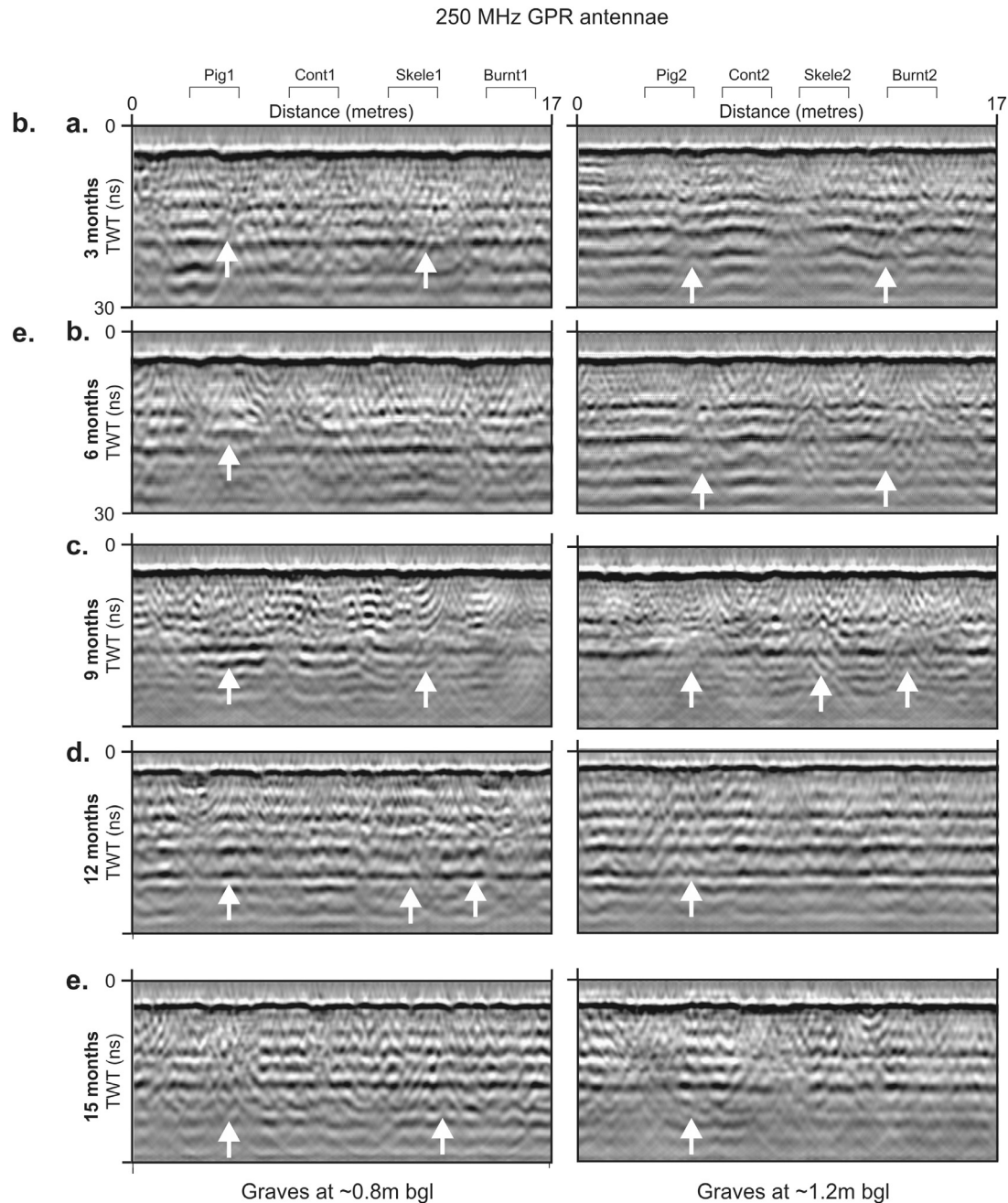
The simulated modern clandestine graves with pigs as murder victims (Pigs1/2) continued (see [57]) to be detected by the 250 MHz 2D profiles throughout the survey period, with either 1/2 hyperbolic reflection events imaged and/or strong horizontal reflection events that may be due to the disturbed grave contents rather than the target itself (Fig. 3a). For the 500 MHz data, however, any 1/2 hyperbolic reflection events on 2D profiles were only imaged over the 0.8 m bgl buried pig, with the 1.2 m bgl buried pig was poorly detected with just weak horizontal reflection events being observed, presumably due to the significantly reduced penetration depth only imaging the disturbed grave soil (Fig. 3b). For both frequency horizontal time-slice data, all of the grave locations were imaged as high amplitude, square-shaped anomalies but the shallow buried (0.8 m bgl) ones were more clearly defined, probably due to the grave soil being imaged (Fig. 4).

The empty control graves were not able to be imaged by both the 250 MHz and the 500 MHz 2D profiles, with only loss of radar signal continuity areas being observed over target positions (Fig. 3). However, the horizontal time-slices did show reasonably high amplitude, square-shaped anomalies over the control grave positions which were also probably imaging the disturbed grave soil (Fig. 4).

The simulated historic clandestine graves with skeletonised remains at both 0.8 m bgl (Skel1) and 1.2 m bgl (Skel2) depths showed variable, low amplitude 1/2 hyperbolic reflection events in the 2D profiles, with both the 250 MHz and 500 MHz datasets showing a loss in radar signal continuity, with the 500 MHz 2D

profiles again being poorly detectable compared to the 250 MHz 2D profiles (Fig. 3). The horizontal time-slices from both frequencies showed reasonably high amplitude, square-shaped anomalies over target positions with again the shallow buried (0.8 m bgl) ones being more clearly defined (Fig. 4).

The simulated historic clandestine graves with beheaded and burnt skeletonised remains at both 0.8 m bgl (Burnt1) and 1.2 m bgl (Burnt2) depths did not show any 1/2 hyperbolic reflection events in the 2D profiles, rather a radar signal loss in continuity were observed over target positions in both frequencies (Fig. 3). The horizontal time-slices from both frequencies showed reasonably high amplitude, square-shaped anomalies over target



**Fig. 3.** (a) Sequential selected GPR 250 MHz 2D profiles taken over the simulated clandestine grave sites, showing: (a) 15 weeks, (b) 32 weeks, (c) 42 weeks, (d) 52 weeks, (e) 66 weeks post-burial respectively. Buried simulated named grave (see Table 1 for detail) positions, burial depths bgl and any resulting 1/2 hyperbolic reflection events (arrows) are marked (see text for details and Fig. 2a for location). (b) Sequential selected GPR 500 MHz time-slices taken over the simulated clandestine grave sites, showing: (a) 42 weeks, (b) 52 weeks, (c) 66 weeks post-burial respectively. Buried simulated named grave (see Table 1 for detail) positions, burial depths bgl and any resulting 1/2 hyperbolic reflection events (arrows) are marked (see text for details and Fig. 2a for location).

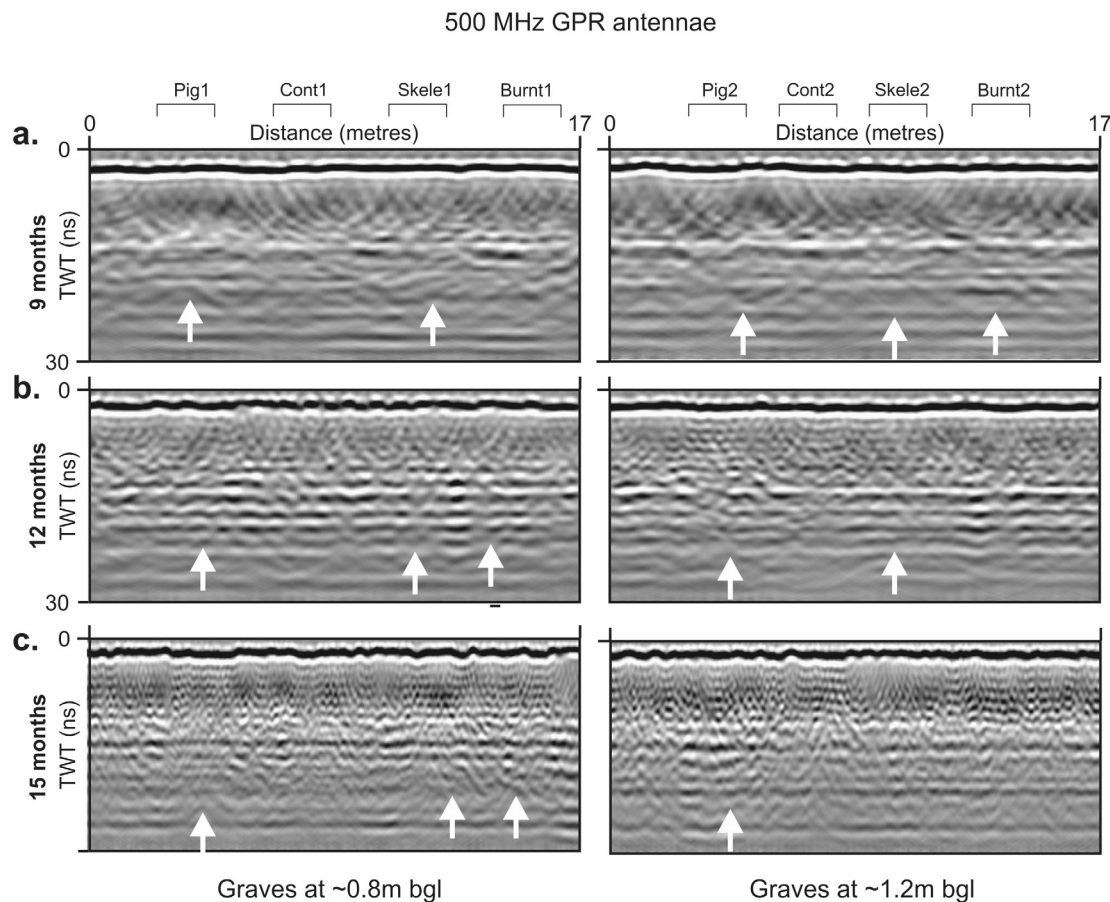


Fig. 3. (Continued).

positions, with again the shallow buried (0.8 m bgl) ones being more clearly defined when compared to the deeper (1.2 m bgl) buried ones (Fig. 4).

### 3.2. Magnetic susceptibility

All simulated burial targets were detected by the magnetic susceptibility inphase component processed survey datasets as relatively low anomalies, when compared to background values (cf. Fig. 5). However, these were temporarily variable and all the skeletonised (Skel1/2) and decapitated and burnt (Burnt 1/2) human remains were relatively harder to define when compared to the other buried targets (Pigs1/2 and Cont1/2), see Fig. 5. These surveys were most probably picking up the disturbed grave soil as [60] also suggests. The simulated shallow buried (0.8 m bgl) graves were also generally better resolved when compared to the deeper buried (1.2 m bgl) graves (Fig. 5).

### 3.3. Bulk ground conductivity

In contrast to the magnetic susceptibility and electrical resistivity results, the bulk ground conductivity processed results were relatively poorly detectable with individual anomalies over target positions not being resolved (cf. Fig. 5). A large and relatively low anomaly, compared to background values, was present in the centre of the survey area and was consistently observed throughout the survey period, which was still present even after de-trending the datasets, which was not observed in the processed magnetic susceptibility and electrical resistivity datasets. The conductivity anomaly was most probably due to either a site effect

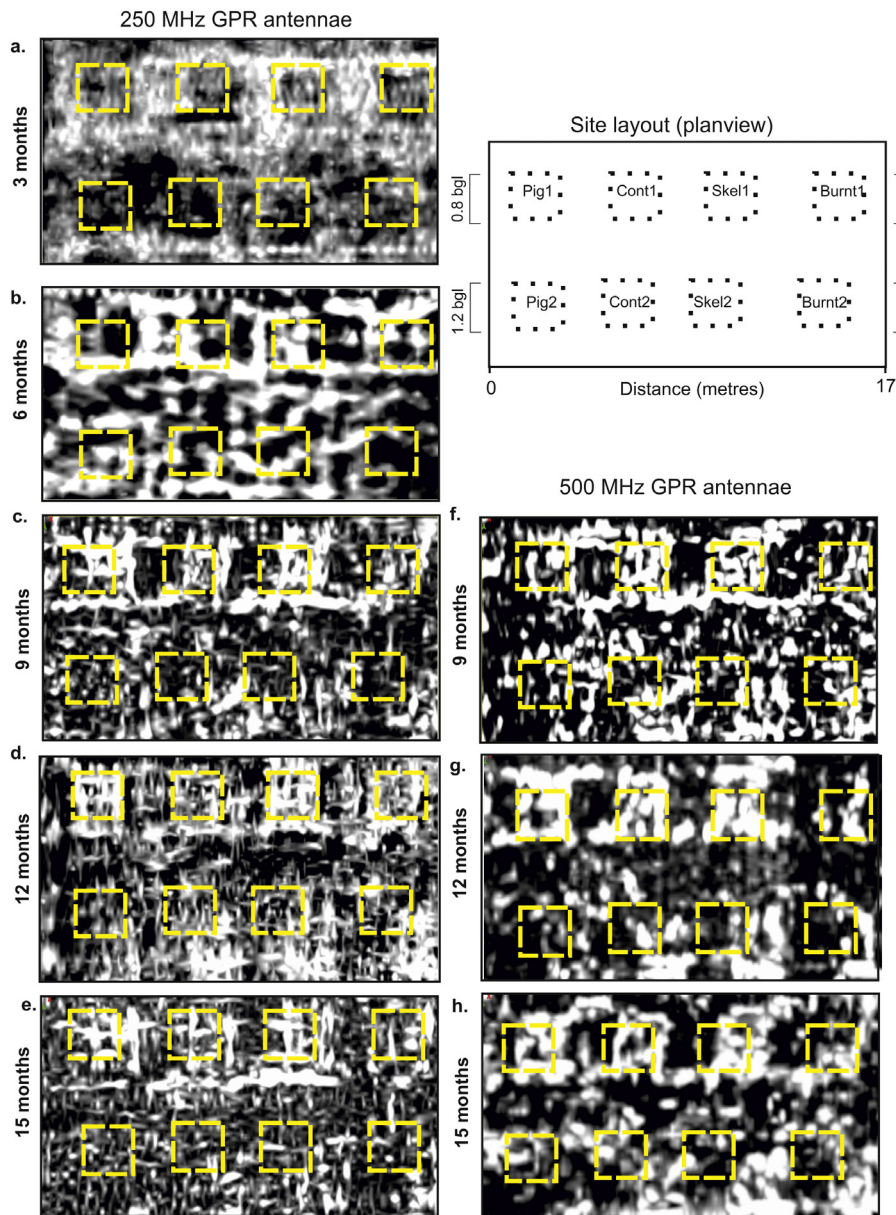
or the data collection equipment not recording correctly, and thus not due to the presence of the simulated clandestine graves.

### 3.4. Electrical resistivity

The electrical resistivity survey processed datasets had mostly relatively high anomalous values, with respect to background values, over target positions throughout the survey period (Fig. 5). This was true of all resistivity datasets over the simulated modern clandestine graves (Pig1/2), although the control graves (Cont1/2) were both high/low anomalies with respect to background values depending upon the survey date (Fig. 5). The simulated historic clandestine graves with skeletonised remains (Skel1.2) were mostly low anomalies, with respect to background values, with the exception of the survey undertaken at 15 months post-burial which had a strong, high anomaly with respect to background values (Fig. 5). The simulated historic clandestine graves with beheaded and burnt skeletonised remains were all high anomalies over target positions, with respect to background values (Fig. 5). Clearly, anomalies present over target positions were variable in both character and strength, although all simulated graves (and indeed the control graves) were imaged. The variability was most probably due to differing grave soil porosities, soil moisture percentages and variable rainfall effects as discussed in [46,48,69].

## 4. Discussion

Whilst the main clandestine graves typically encountered by forensic search teams in Latin America were discussed in [57], this is the first published forensic geophysical research using a



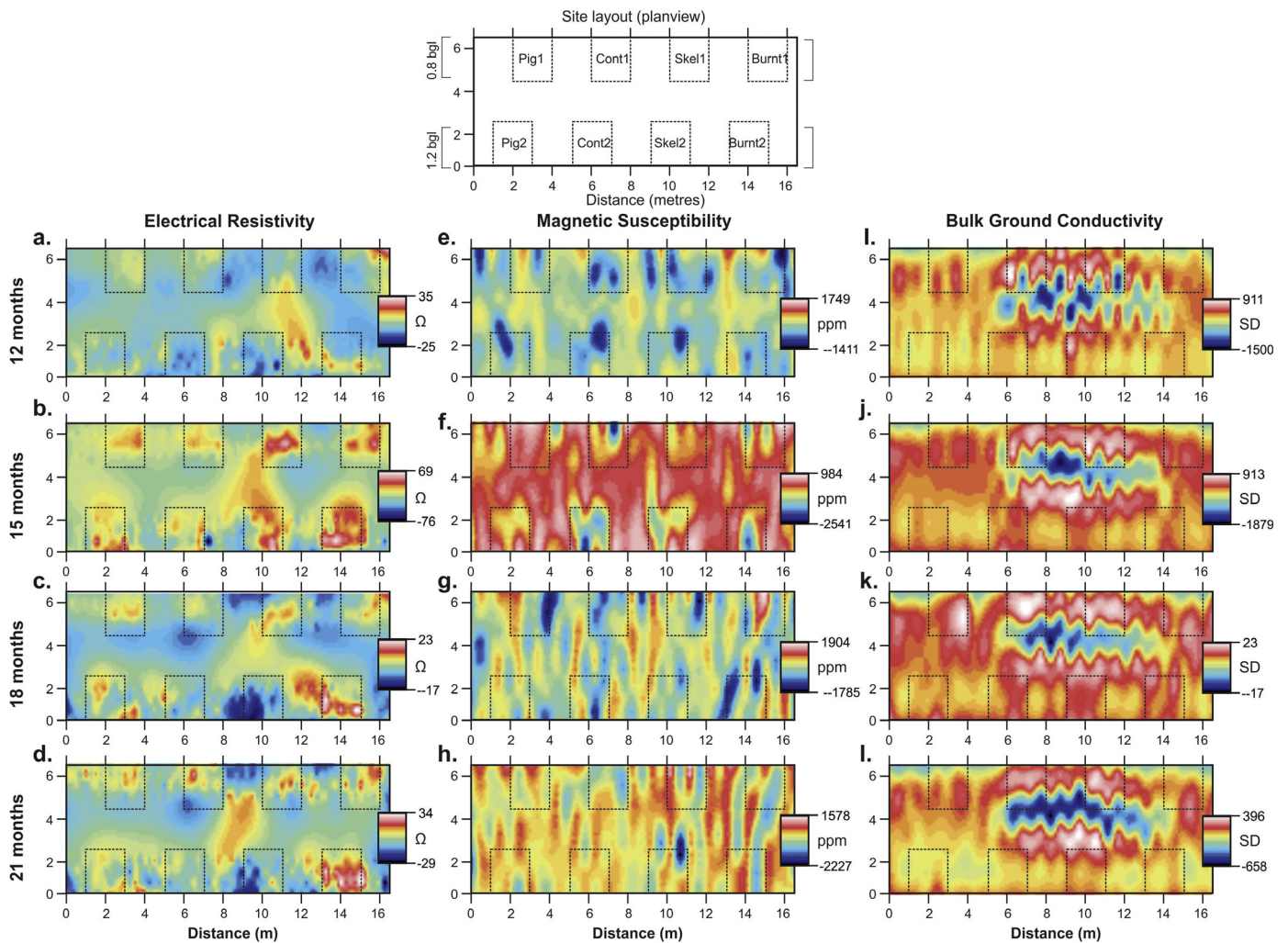
**Fig. 4.** Sequential GPR 2D horizontal time slice taken over the simulated clandestine grave sites, showing 225 MHz datasets for; a. 15 weeks, b. 32 weeks, c. 42 weeks, d. 52 weeks, e. 66 weeks and for 450 MHz datasets, f. 42 weeks, g. 52 weeks, h. 66 weeks post-burial respectively. Buried simulated named grave (see Table 1 for detail) positions and depths bgl shown (see text for details and Fig. 2a for location).

combination of geophysical techniques conducted over simulated clandestine graves for a significant time post-burial in Latin America. This has therefore allowed some basic questions posed by forensic search teams to be addressed and indeed compared to other published forensic research and case studies.

The research aims were “*firstly to assess whether these methods could detect the simulated graves*”. GPR was successful in identifying grave positions using the 250 MHz frequency antennae on 2D profiles, with the simulated modern clandestine graves (Pig1/2) imaged best, followed by the simulated historic clandestine graves with skeletonised remains (Skel1/2), the control empty graves (Cont1/2) and finally the simulated historic clandestine graves with burnt remains (Skel1/2). However some target locations were imaged as radar signal loss in continuity rather than an object which may be due to imaging the disturbed grave soil. The 500 MHz frequency datasets were all less successful at imaging the buried targets when compared to the 250 MHz

antennae, as other authors have noted [50,52,53]. In contrast to the GPR 2D profile results, the horizontal time-slices for all surveys using both frequencies were much better, resolving the target locations throughout. This was most probably due to this data imaging the disturbed grave soil, showing the importance of collecting multiple 2D survey lines over suspect burial positions in forensic geophysics searches so that time-slices can be generated. Both magnetic susceptibility and electrical resistivity were good at resolving target burials as other authors have begun to find [54,59,60]. The bulk ground conductivity surveys were not able to detect the buried targets, mirroring the results of other forensic geophysical surveys to detect individual burials (see [64,65]), in contrast to one successful study [66]. Of course it should be noted that ‘grave soil’ on the simulated historic graves would not be the same as true historic graves as they were only re-instated and thus this study results for such targets should be used with caution when preparing for such surveys.





**Fig. 5.** Sequential electrical resistivity, magnetic susceptibility and bulk ground conductivity mapview datasets at: (a, e, i) 52 weeks, (b, f, j) 68 weeks, (c, g, k) 78 weeks, and (d, h, l) 90 weeks post-burial respectively. Buried simulated grave positions shown at top and dotted lines throughout (see text for details).

The paper's second aim was to determine if there was an optimal time for surveying post-burial. GPR 2D profiles were generally good at detecting the simulated burials during the early weeks of monitoring but saw a progressive lessening of signal amplitudes up until the end of the survey period (Fig. 3). This has also been shown in other control studies due to both target skeletonisation and grave soil compaction to background levels (see, e.g. [45,47,52,53]). The GPR horizontal time-slices generated from both frequencies all showed good target detection, especially so in the case of the shallower (0.8 m bgl) buried ones, which is thus deemed crucial to undertake regardless of post-burial age. The 12 months summer magnetic susceptibility and electrical resistivity surveys were not optimal (Fig. 5), rather it was the 15 and 18 month autumn and winter months which produced better results; if therefore forensic search surveys in such depositional environments could be timed to coincide with these seasonal months, their results should then be optimal for target detection. It should also be stated that the disturbed grave soil was detected more than the burial targets themselves. From this study's results it was determined that bulk ground conductivity surveys should not be used in this depositional environment, in contrast to the [46] simulated urban clandestine grave study.

The paper's third aim was to compare this study's results to other studies. Although this has been partially answered in the first two

sections, clearly there are similarities with this study's results when compared with other controlled studies, albeit there have not been any others published in South America. Controlled studies in both North America [45,47,50,52] and Europe [46,53] have shown forensic GPR surveys to be an effective near-surface geophysical detection technique for both clandestine graves and historic burials, with electrical resistivity surveys also found to be promising. Magnetic susceptibility surveys are beginning to be used for forensic applications [51,60], and here has also shown to be promising. Electrical resistivity surveys were found to be successful, mirroring European control studies [46,48,49,53]. Bulk ground conductivity surveys were not that successful here, similar to a UK urban control grave study [46], although this does contrast with a successful conductivity survey to detect a clandestine grave in woodland in New Zealand [38]. Interestingly, the control graves in this study were detectable, in contrast to the [53] semi-rural environment control study.

## 5. Conclusions

Simulated clandestine graves commonly encountered in Latin America were created on a control test site near Bogota, Colombia. The clandestine graves included 1/2 clothed pig cadavers to simulated modern clandestine graves of murder victims, and

simulated historic graves using both donated skeletonised human remains and beheaded and burnt donated skeletonised human remains. These were buried at both relatively shallow (0.8 m bgl) and deep (1.2 m bgl) depths with control empty graves also created.

Sequential monitoring of the simulated clandestine graves over 21 months post-burial evidenced that the simulated modern clandestine burials could be imaged throughout the survey period using GPR, electrical resistivity and magnetic susceptibility. The simulated historic skeletonised remains were reasonably well imaged but the beheaded and burnt skeletonised remains were relatively poorly detected throughout the survey period. Most probably the disturbed grave soil provided a geophysical contrast with surrounding targets, which was especially important when viewing the GPR horizontal time-slice data. The 500 MHz datasets were all consistently poorer when compared to the 250 MHz datasets with reduced signal amplitudes throughout. Interestingly the control graves were imaged as reduced signal amplitude areas when compared to background values. Bulk ground conductivity surveys were not successful at detecting the simulated targets.

Further work should continue to geophysically monitor these surveys until the simulated clandestine graves can no longer be detected which will provide an important time-line for forensic search teams undertaking searches. In addition, perhaps other techniques (e.g. Electrical Resistivity Imaging or ERI) may also need to be investigated as potential complementary near-surface geophysical search techniques. These simulated graves should also be created in other soil types and depositional environments in Latin America. Simulated mass human burials should also be created and be geophysically monitored over time as this is also sadly a common burial scenario encountered in South America. The detection techniques used in this study should also be used in real forensic search scenarios in Latin America to investigate their effectiveness at burial target detection.

### Role of the funding source

There was no involvement of any funding sources with this project.

### Acknowledgements

The authors would like to thank the Universidad Nacional de Colombia for permission to undertake the study, especially to Centro Agropecuario Marengo. The Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses is acknowledged for giving partial time for the lead author to undertake research. GeoSense for loan of the GPR equipment and Sandox for loan EMI equipment. The Colombian Association for Forensic Anthropology is thanked for donation of human remains used during this study a historical archaeological rescue (ACAF 031-12). A Santander fellowship in collaboration with Keele University funded a short research exchange programme for the lead author. The Instituto Geográfico Agustín Codazzi is acknowledged for doing soil analysis and the Centro de Investigación Tibaitatá-IDEAM is thanked for providing meteorological datasets. Finally the authors would like to thank two anonymous reviewers who have greatly improved the manuscript.

### References

- [1] Proyecto Desaparecidos. Por la Memoria, la Verdad y la Justicia. Available online at <http://www.desaparecidos.org> (last accessed: 24.05.14).
- [2] National Institute of Legal Medicine and Forensic Sciences, Colombia. Available online at [www.medicinalegal.gov.co](http://www.medicinalegal.gov.co) (last accessed: 14.04.14).
- [3] H.E. Solla, M.Y. Işcan, Skeletonised remains of Dr. Eugenio Berríos Sagredo, *Forensic Sci. Int.* 116 (2001) 201–211.
- [4] M.Y. Işcan, H.E. Solla, B.Q. McCabe, Victim of a dictatorial regime: identification of Mr. Roberto Gomensoro Josman, *Forensic Sci. Int.* 151 (2005) 213–220.
- [5] C.G. Varas, M.I. Leiva, Managing comingled remains from mass graves: considerations, implications and recommendations from a human rights case in Chile, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e19–e24.
- [6] A. Ruffell, A. McCabe, C. Donnelly, B. Sloan, Location and assessment of an historic (150–160 years old) mass grave using geographic and ground penetrating radar investigation, NW Ireland, *J. Forensic Sci.* 54 (2009) 382–394.
- [7] A. Witten, R. Brooks, T. Fenner, The Tulsa race riot of 1921: a geophysical study to locate a mass grave, *Leading Edge* 20 (2000) 655–660.
- [8] L. Ríos, J.L.C. Overjero, J.P. Prieto, Identification process in mass graves from the Spanish Civil War I, *Forensic Sci. Int.* 199 (2010) e27–e36.
- [9] L. Ríos, A. García-Rubio, B. Martínez, A. Alonso, J. Puente, Identification process in mass graves from the Spanish Civil War II, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e4–e9.
- [10] J.-P. Fernandez-Alvarez, D. Rubio-Melendi, A. Martínez-Velasco, J.K. Pringle, D. Aguilera, Discovery of a mass grave from the Spanish Civil War using GPR and forensic archaeology, *Forensic Sci. Int.* (in press).
- [11] S. Fiedler, J. Berger, K. Stahr, M. Graw, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller (Eds.), Localisation of a Mass Grave from the Nazi Era—A Case Study, Springer Pub, 2009, pp. 303–314.
- [12] A. Ossokowski, M. Kuś, P. Brzeziński, J. Prüffer, J. Piatek, G. Zielińska, et al., Example of human individual identification from World War II gravesite, *Forensic Sci. Int.* 233 (2013) 179–192.
- [13] L. Szleszkowski, A. Thannhäuser, K. Szwagrzyk, P. Konczewski, J. Kawecki, B. Świątek, Exhumation research concerning the victims of political repressions in 1945–1956 in Poland: a new direction in forensic medicine, *Forensic Sci. Int.* 235 (2014) e1–e6.
- [14] Independent Commission for the Location of Victims Remains. Accessible online at: <http://www.iclvr.ie/> (last accessed: 26.04.14).
- [15] A.G. Brown, The use of forensic botany and geology in war crimes investigations in NE Bosnia, *Forensic Sci. Int.* 163 (2006) 204–210.
- [16] M. Dajuric, D. Dunjic, D. Djonic, M. Skinner, Identification of victims from two mass-graves in Serbia: a critical evaluation of classical markers of identity, *Forensic Sci. Int.* 172 (2007) 125–129.
- [17] Syrian Observatory for Human Rights. Available online at [www.syriahr.com](http://www.syriahr.com) (last accessed: 08.06.15).
- [18] J.K. Pringle, A. Ruffell, J.R. Jervis, J.D. Donnelly, J. McKinley, J.D. Hansen, R. Morgan, D. Pirrie, M. Harrison, The use of geoscience methods for terrestrial forensic searches, *Earth Sci. Rev.* 114 (2012) 108–123.
- [19] R. Parker, A. Ruffell, D. Hughes, J. Pringle, Geophysics and the search of freshwater bodies: a review, *Sci. Justice* 50 (2010) 141–149.
- [20] M. Kalacska, L.S. Bell, G.A. Sanchez-Azofeifa, T. Caelli, The application of remote sensing for detecting mass graves: an experimental animal case study from Costa Rica, *J. Forensic Sci.* 54 (2009) 159–166.
- [21] A. Ruffell, J. McKinley, *Forensic geomorphology*, *Geomorphology* 206 (2014) 14–22.
- [22] M. Harrison, L.J. Donnelly, Locating concealed homicide victims: developing the role of geoforensics, in: K. Ritz, L. Dawson, D. Miller (Eds.), *Criminal and Environmental Soil Forensics*, Springer, 2009, pp. 197–219.
- [23] D.O. Larson, A.A. Vass, M. Wise, Advanced scientific methods and procedures in the forensic investigation of clandestine graves, *J. Contemp. Crim. Justice* 27 (2011) 149–182.
- [24] I. Aquila, F. Ausernia, C. Di Nunzio, A. Serra, S. Boca, A. Capelli, et al., The role of forensic botany in crime scene investigation: case report and review of literature, *J. Forensic Sci.* 59 (2014) 820–824.
- [25] H.M. Coyle, *Forensic Botany: Principles and Applications to Criminal Casework*, CRC Press, 2005.
- [26] D. Gennard, *Forensic Entomology: An Introduction*, 2nd ed., Wiley-Blackwell, 2012.
- [27] J. Amendt, C.P. Campobasso, E. Gaudry, C. Reiter, H.N. LeBlanc, M.J.R. Hall, Best practice in forensic entomology: standards and guidelines, *Int. J. Legal Med.* 121 (2007) 90–104.
- [28] A. Lasseter, K.P. Jacobi, R. Farley, L. Hensel, Cadaver dog and handler team capabilities in the recovery of buried human remains in the Southeastern United States, *J. Forensic Sci.* 48 (2003) 1–5.
- [29] T.L. Dupras, J.J. Schultz, S.M. Wheeler, L.J. Williams, *Forensic Recovery of Human Remains*, CRC Press, 2006.
- [30] E.W. Killam, *The Detection of Human Remains*, Charles C Thomas Pubs., Springfield, USA, 2004.
- [31] A. Ruffell, Burial location using cheap and reliable quantitative probe measurements, *Forensic Sci. Int.* 151 (2005) 207–211.
- [32] D.W. Owsley, Techniques for locating burials, with emphasis on the probe, *J. Forensic Sci.* 40 (1995) 735–740.
- [33] A.A. Vass, R.R. Smith, C.V. Thompson, M.N. Burnett, N. Dulgerian, B.A. Eckenrode, Odor analysis of decomposing human remains, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 384–391.
- [34] D.O. Carter, D. Yellowlees, M. Tibbett, Using ninhydrin to detect gravesoil, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 397–400.
- [35] J. Dekeirsschietter, F.J. Verheggen, M. Gohy, F. Hübner, L. Bourguignon, G. Lognay, et al., Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus*) in different biotopes, *Forensic Sci. Int.* 189 (2009) 46–53.
- [36] D.L. France, T.J. Griffin, J.C. Swanburg, J.W. Lindemann, G.C. Davenport, V. Trammell, et al., A multidisciplinary approach to the detection of clandestine graves, *J. Forensic Sci.* 37 (1992) 1445–1458.
- [37] K. Powell, Detecting human remains using near-surface geophysical instruments, *Expl. Geophys.* 35 (2004) 88–92.
- [38] D.C. Nobes, The search for “Yvonne”: a case example of the delineation of a grave using near-surface geophysical methods, *J. Forensic Sci.* 45 (2000) 715–721.

- [39] P. Cheetham, Forensic geophysical survey, in: J. Hunter, M. Cox (Eds.), *Forensic Archaeology: Advances in Theory and Practice*, Routledge, 2005, pp. 62–95.
- [40] A. Ruffell, Searching for the IRA “disappeared”: ground penetrating radar investigation of a churchyard burial site, *J. Forensic Sci.* 50 (2005) 1430–1435.
- [41] J.J. Schultz, Using ground-penetrating radar to locate clandestine graves of homicide victims: forming forensic archaeology partnerships with law enforcement, *Homicide Studies* 11 (2007) 15–29.
- [42] J.K. Pringle, J.R. Jervis, Electrical resistivity survey to search for a recent clandestine burial of a homicide victim, UK, *Forensic Sci. Int.* 202 (2010) e1–e7.
- [43] A. Novo, H. Lorenzo, F. Ria, M. Solla, 3D GPR in forensics: finding a clandestine grave in a mountainous environment, *Forensic Sci. Int.* 204 (2011) 134–138.
- [44] K.B. Strongman, Forensic applications of ground penetrating radar, in: J. Pilon (Ed.), *Ground Penetrating Radar*, Geol. Survey Canada Paper 90 (4) (1992) 203–211.
- [45] J.J. Schultz, M.E. Collins, A.B. Falsetti, Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 51 (2006) 607–616.
- [46] J.K. Pringle, J.R. Jervis, J.P. Cassella, N.J. Cassidy, Time-lapse geophysical investigations over a simulated urban clandestine grave, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 1405–1417.
- [47] J.J. Schultz, Sequential monitoring of burials containing small pig cadavers using ground-penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 279–287.
- [48] J.R. Jervis, J.K. Pringle, G.W. Tuckwell, Time-lapse resistivity surveys over simulated clandestine graves, *Forensic Sci. Int.* 192 (2009) 7–13.
- [49] A. Juerges, J.K. Pringle, J.R. Jervis, P. Masters, Comparisons of magnetic and electrical resistivity surveys over simulated clandestine graves in contrasting burial environments, *Near Surf. Geophys.* 8 (2010) 529–539.
- [50] J.J. Schultz, M.M. Martin, Controlled GPR grave research: comparison of reflection profiles between 500- and 250-MHz antennae, *Forensic Sci. Int.* 209 (2011) 64–69.
- [51] J.K. Pringle, C. Holland, K. Szkornik, M. Harrison, Establishing forensic search methodologies and geophysical surveying for the detection of clandestine graves in coastal beach environments, *Forensic Sci. Int.* 219 (2012) e29–e36.
- [52] J.J. Schultz, M.M. Martin, Monitoring controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar, *J. Appl. Geophys.* 83 (2012) 74–89.
- [53] J.K. Pringle, J.R. Jervis, J.D. Hansen, N.J. Cassidy, G.M. Jones, J.P. Cassella, Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and Ground Penetrating Radar methods: 0–3 years, *J. Forensic Sci.* 57 (2012) 1467–1486.
- [54] J.D. Hansen, J.K. Pringle, Comparison of magnetic, electrical and GPR surveys to detect buried forensic objects in semi-urban and domestic patio environments, in: D. Pirrie, A. Ruffell, L.A. Dawson (Eds.), *Environmental & Criminal Geoforensics*, 384, Geol. Soc. London Spec. Pub., 2013, pp. 229–251.
- [55] A. Ruffell, J.K. Pringle, S. Forbes, Search protocols for hidden forensic objects beneath floors and within walls, *Forensic Sci. Int.* 237 (2014) 137–145.
- [56] J.K. Pringle, J.P. Cassella, J.R. Jervis, A. Williams, P. Cross, N.J. Cassidy, Soilwater conductivity analysis to date and locate clandestine graves of homicide victims, *J. For. Sci.* 60 (2015) 1052–1060.
- [57] C.M. Molina, J.K. Pringle, M. Saumett, O. Hernandez, Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany, *Forensic Sci. Int.* 248 (2015) 61–70.
- [58] P.S. Miller, Disturbances in the soil: finding buried bodies and other evidence using ground penetrating radar, *J. Forensic Sci.* 41 (1996) 648–652.
- [59] N. Linford, Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves, *Arch. Prosp.* 11 (2004) 167–180.
- [60] J.K. Pringle, M. Giubertoni, N.J. Cassidy, K. Wisniewski, J.D. Hansen, N. Linford, R. Daniels, The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool, *Forensic Sci. Int.* 246 (2015) 31–42.
- [61] A. Guedes, R. Murray, H. Ribeiro, H. Sant’Ovaia, B. Valentim, A. Rodrigues, S. Leal, F. Noronha, The Potential Application of Magnetic Susceptibility as a Technique for Soil Forensic Examinations, 384, Geol. Soc. London Spec. Pub., 2013, pp. 75–83.
- [62] C. Manrong, Y. Lizhong, N. Xiangfeng, C. Bin, Application of environmental magnetism on crime detection in a highway traffic accident from Yangzhou to Guazhou, Jiangsu Province, China, *Forensic Sci. Int.* 187 (2009) 29–33.
- [63] J.M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed., Wiley, 2011.
- [64] D.C. Nobes, Geophysical surveys of burial sites: a case study of the Oaro Urupa site, *Geophysics* 64 (1999) 357–367.
- [65] D.P. Bigman, The use of electromagnetic induction in locating graves and mapping cemeteries: an example from Native North America, *Arch. Prospect.* 19 (2012) 31–39.
- [66] H.C. Dick, J.K. Pringle, B. Sloane, J. Carver, A. Haffenden, S. Porter, et al., Detecting and characterising of Black Death burials by multi-proxy geophysical methods, *J. Arch. Sci.* 59 (2015) 132–141.
- [67] B.B. Ellwood, Electrical resistivity surveys in two historical cemeteries in north-east Texas: a method for delineating unidentified burial shafts, *Hist. Arch.* 24 (1999) 91–98.
- [68] H.C. Matias, F.A. Monteiro Santos, F.E. Rodrigues Ferreira, C. Machado, R. Luzio, Detection of graves using the micro-resistivity method, *Ann. Geophys.* 49 (2006) 1235–1244.
- [69] J.R. Jervis, J.K. Pringle, A study of the affect of seasonal climatic factors on the electrical resistivity response of three experimental graves, *J. Appl. Geophys.* 108 (2014) 53–60.
- [70] J.D. Hansen, J.K. Pringle, J. Goodwin, J. GPR and bulk ground resistivity surveys in graveyards: locating unmarked burials in contrasting soil types, *Forensic Sci. Int.* 237 (2014) e14–e29.
- [71] Centro Agropecuario Marengo at the Universidad Nacional de Colombia. Available online at: <http://www.marengo.unal.edu.co> (last accessed: 07.10.15).
- [72] Fiscalía General de la Nación. Available online at <http://www.fiscalia.gov.co> (last accessed: 09.06.15).
- [73] M. de Osorio, Ética en la investigación con modelos animales experimentales, Alternativas y las 3 RS de Russel, Una responsabilidad y un compromiso ético que nos compete a todos (2006) 163–183.
- [74] Centro Nacional de Memoria Histórica. Available online at <http://www.centrodehistoria.gov.co> (last accessed: 09.06.15).
- [75] J. Thiesson, G. Rousselle, F. Simon, A. Tabbagh, Slingram EMI prospection: Are vertical orientated devices a suitable solution in archaeological and pedological prospection? *J. Appl. Geophys.* 75 (2011) 731–737.